



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden korkeakoulu

Jenni Venäläinen

Kaukolämpöverkon perusparantaminen



Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Vantaalla 14.8.2012

Valvoja: Professori Risto Lahdelma

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Pertti Sahi

AALTO-YLIOPISTO TEKNIKAN KORKEAKOULUT PL 12100, 00076 Aalto http://www.aalto.fi		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Jenni Venäläinen			
Työn nimi: Kaukolämpöverkon perusparantaminen			
Korkeakoulu: Insinööritieteiden korkeakoulu			
Laitos: Energiatekniikan laitos			
Professuuri: Energiatalous ja voimalaitostekniikka		Koodi: Ene-59	
Työn valvoja: Professori Risto Lahdelma Työn ohjaaja: Diplomi-insinööri Pertti Sahi			
<p>Tässä diplomityössä on tarkasteltu Vantaan Energia Oy:n kaukolämpöverkkoa perusparannussuunnittelun näkökulmasta. Kaukolämpöjohtojen ikää ei voida käyttää perusparantamista ohjaavana tekijänä, sillä osa johdoista on vielä vuosikymmenien käytön jälkeenkin erinomaisessa kunnossa. Sen sijaan monilla muilla tekijöillä, kuten vaihtelevalla rakentamisen laadulla ja liikenteen aiheuttamalla kuormituksella, on monesti havaittavissa paljon keskeisempi vaikutus yksittäisten johto-osuuksien vikaantuvuuksiin.</p> <p>Käytännön perusparannussuunnittelua varten työssä on arvioitu vuosittain tarvittavan perusparannusvolyymien tasoa ja tavoitevolyymien mahdollistavan budjetin suuruutta. Rajallisten perusparannusresurssien kohdistamiseksi tarkoituksenmukaisesti työssä on määritelty myös eritoten kriittiseksi luokiteltava johtokanta, jota systemaattisen perusparantamisen tulisi ensisijaisesti koskea. Hyväkuntoisia kaukolämpöjohtoja ei ole tarkoituksenmukaista vaihtaa ensitilassa, vaikka ne olisivatkin luokiteltavissa kriittisiin johtoihin, minkä vuoksi työssä on kartoitettu Vantaan kaukolämpöverkon huonokuntoisimmat johto-osuudet vauriotilastomateriaalin perusteella. Toisaalta perusparannuskohteista päättäminen ei voi myöskään perustua pelkästään yksittäisten huonokuntoisten johto-osuuksien tunnistamiseen. Kaukolämpöverkko on sen sijaan nähtävä kokonaisuutena, jossa eri johto-osuuksilla on toisiinsa nähden erilainen rooli ja merkitys. Tämän huomioimiseksi verkosta laadittiin riskikartoitus, jossa suuren vaurioriskin takia kriittisten johtojen lisäksi nimettiin myös lämmöntoimituksen ja -tuotannon sekä turvallisuuden kannalta kriittiset johto-osuudet. Riskikartoituksen avulla on tarkoitus saada aikaisempaa helpommin käsitys ensi tilassa perusparannettavista kohteista ja toimia päätöksenteon työkaluna sen kuitenkin jättäessä varsinaisen perusparannusjärjestyksen määrittämisen vielä päätöksentekovastuussa olevalla.</p> <p>Perusparantamisen ollessa rahallisesti mittava investointi tarkasteltiin työn lopussa myös johtojen uusimisen taloudellista kannattavuutta huomioiden perusparantamisella saavutettavissa olevat säästöpotentiaalit, kuten lämpöhäviöiden ja korjauskustannusten pieneneminen. Laskelmaesimerkkien perusteella perusparantamista ei voida pitää taloudellisesti kannattavana investointina, vaikka saavutettavissa olevat säästöt ovatkin merkittäviä. Kustannussäästöjä voidaan kuitenkin pitää erinomaisena lisäperusteena johto-osuuksien uusimiselle verkon käytettävyyden ja luotettavuuden parantamisen ollessa kuitenkin ensisijainen tavoite.</p>			
Päivämäärä: 14.8.2012		Kieli: Suomi	
		Sivumäärä: 127 + 1 liite	
Avainsanat: kaukolämpö, perusparantaminen, kaukolämpöjohdot, vikaantuvuus			

AALTO UNIVERSITY Schools of Technology PO Box 12100, FI-00076 AALTO http://www.aalto.fi		ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	
Author: Jenni Venäläinen			
Title: Renovation of District Heating Network			
School: School of Engineering			
Department: Department of Energy Technology			
Professorship: Energy Economics and Power Plant Engineering		Code: Ene-59	
Supervisor: Professor Risto Lahdelma Instructor: Pertti Sahi, M.Sc. (Tech.)			
<p> This master's thesis examines the district heating network of Vantaan Energia from the perspective of its renovation. The age of district heating network cannot be used as a guiding factor when deciding the targets of renovation because some of the pipes are in excellent condition even after decades of use. Instead, other factors such as the quality of construction and the load caused by traffic may often have a more essential impact on the observed faults in individual pipes. Therefore, this thesis begins with determining those factors that expose pipes to faults. This makes it possible to anticipate which pipes may have more than an average risk to be damaged in the near future and which thus need particular attention. </p> <p> For the renovation planning in practice the annual required renovation volume and the size of budget enabling this volume has been assessed. Because resources are limited, it is extremely important that they can be targeted as appropriately as possible. Therefore, a specific pipe category has been defined. This pipe category includes pipes that can be classified as critical and should be seen as the main target for systematic renovation. Neither will it be strategically worthwhile to replace pipes in good shape. For this reason, also the pipes in the worst shape have been surveyed by using the damage statistics over the past years. However, the decisions concerning the renovation cannot only be based on the idea of recognizing single pipes in poor shape. Instead, the district heating network should be seen as a whole in which each different pipe section has its own different meaning and role. To take this into consideration, a risk map of the network was formed. In this map, in addition to considering the pipes with a high leakage risk, also the pipes critical for heat supply and general safety were considered. The purpose of risk mapping is to work as a tool in recognizing more easily the pipe sections which should be selected for replacement first, yet leaving the exact order of replacements to the decision-making body. </p> <p> Knowing that renovation of district heating network is high investment, the economic profitability of pipe replacement has also been examined at the end of this thesis, taking into consideration the saving potentials related to renovation such as decreasing of heat losses and repair costs. On the basis of calculation examples, pipe replacement cannot be regarded as economically profitable investment although the savings which can be obtained are significant. Cost savings, nevertheless, can be considered a great additional argument for renovation while the improvement of availability and reliability of network will be the main objectives. </p>			
Date: 14.8.2012		Language: Finnish	
		Number of pages: 127 + 1 appendix	
Keywords: district heating, renovation, district heating pipes, failure rate			

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Vantaan Energia Oy:ssä tuotannon ja lämmönjakelu -yksikön alaisuudessa. Haluan kiittää ohjaajaani Pertti Sahia paitsi asiantuntevasta työn ohjauksesta niin myös hyvin opettavaisista keskusteluista sekä niiden pohjalta heränneistä ajatuksista. Erittäin mielenkiintoisesta diplomityön aiheesta ja tuesta työn tekemisessä kiitän Heikki Ojansuuta. Erityiskiitokset työn aiheen ja sisällön ideoinnista kuuluvat myös Markus Siitoselle, minkä lisäksi kiitän kaikkia työssä avustaneita Vantaan Energian työntekijöitä.

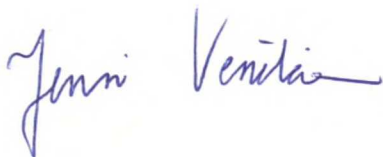
Diplomityön on valvonut professori Risto Lahdelma ja tarkistanut sen yhdessä professori Pekka Ahtilan kanssa Aalto yliopiston Insinöörیتieteiden korkeakoulusta. Kiitos siitä heille.

Unohtumattomista opiskeluaajoista kiitokset ystäväilleni ja opiskelutovereilleni.

Lopuksi vielä lämpimät kiitokset vanhemmilleni, muille perheenjäsenilleni sekä läheisilleni, jotka ovat kannustaneet, tukeneet ja antaneet voimia pitkän opintotaipaleeni ajan.

Nyt on aika jättää yksi vaihe elämässä taakse hyvillä mielin ja siirtyä kohti uusia haasteita, pitäen mielessä, että lopulta se on oppia ikä kaikki!

Vantaalla 14.8.2012



Jenni Venäläinen

Sisällysluettelo

Alkusanat	1
Merkinnät	3
Lyhenteet	5
1 Johdanto	6
2 Kaukolämpöverkko	8
2.1 Kaukolämpöjohdot	9
2.1.1 Betonielementtikanavajohdot	13
2.1.2 Vapaastiliikkuvat muovisuojakuorijohdot (Mpul ja 2Mpul)	14
2.1.3 Kiinnivaahdotetut muovisuojakuorijohdot (Mpuk ja 2Mpuk)	15
2.1.4 Muut rakenteet	16
2.2 Muovisuojakuorijohtojen liitosratkaisut	18
2.3 Lämmön siirto ja jakelu	20
3 Kaukolämpöverkon vuodot	22
3.1 Johtojen vikaantuvuuteen vaikuttavat tekijät	22
3.1.1 Maaperä ja liikenne	23
3.1.2 Pohjavesi	25
3.1.3 Kiertoveden laatu	25
3.1.4 Paine ja lämpötila	26
3.1.5 Johtorakenne	27
3.1.6 Rakentamisen laatu	27
3.2 Kaukolämpöverkkojen vikaantuvuus ja tyypillisimmät johtovauriot Suomessa	28
3.3 Odotettavissa olevien vaurioiden mallintaminen	31
3.4 Vuotokohtien paikallistaminen	35
3.5 Rakentamisen laadunvarmistus	37
4 Kaukolämpöverkon perusparantaminen	40
4.1 Perusparantamisen määrittely	40
4.2 Lämmön toimitusvarmuus	43
4.3 Perusparantamisen säästöpotentiaalit ja taloudellinen kannattavuus	44
4.3.1 Lämpöhäviöt	45
4.3.2 Lisävesikustannukset	50
4.3.3 Huolto- ja kunnossapitokustannukset	53

4.3.4	Vuotojen korjauskustannukset	53
4.3.5	Korjausten välilliset kustannukset.....	55
4.3.6	Putkidimension muuttaminen.....	57
4.3.7	Kustannukset ja laajuuden määrittäminen	59
4.3.8	Kannattavuuden määrittäminen	61
4.4	Verkon kunnon määrittäminen	63
4.5	Perusparannuskohteista päättäminen.....	64
5	Vantaan Energian kaukolämpöverkko	66
5.1	Vantaan kaukolämpöjohtokanta	67
5.2	Verkon kunnossapito	70
5.3	Kaukolämpöverkon vauriot ja käyttövarmuus	72
5.3.1	Tyypillisimmät johtovauriot	72
5.3.2	Kaukolämpöverkon vikaantuvuus Vantaalla	76
5.3.3	Vikaantuvuuksien teemakartoitus	84
6	Vantaan kaukolämpöverkon perusparantaminen	88
6.1	Perusparantamisen nykytila ja tarve tulevaisuudessa.....	88
6.2	Perusparantamisen tavoitteet ja niiden saavuttaminen	90
6.3	Kaukolämpöverkon riskikartoitus	94
6.4	Perusparantamisen kustannustarkastelu	98
6.4.1	Vauriokehityksen arvioiminen	99
6.4.2	Raappavuorentie DN 400	101
6.4.3	Martinkyläntie DN 500	108
7	Yhteenveto	120
	Lähteet.....	122
	Liiteluettelo	128

Merkinnät

A	[m ²]	pinta-ala
B	[kpl/km,a]	vauriotaajuus
Cd	[-]	purkautumiskerroin
CF	[€]	kassavirta
C	[€/MWh]	kate
D	[mm]	halkaisija
E	[-]	odotusarvo
H	[m]	pumpun nostokorkeus
H _{pk}	[m]	virtaavan aineen painekorkeus
G	[-]	kasvunopeusvakio
K	[€]	kustannus
N	[kpl]	lukumäärä
P _p	[W]	pumppausteho
Q	[m ³ /s]	vuotoveden tilavuusvirta
R	[m°C/W]	lämpövastus
S	[€]	säästö
T	[°C]	lämpötila
U	[W/m,°C]	lämmönläpäisyluku
\dot{V}	[m ³ /h]	tilavuusvesivirta
W	[J, Wh]	energiamäärä
c	[-]	vuotovakio
c _p	[J/kg,°C]	ominaislämpökapasiteetti
f	[kpl/a]	vikataajuus
g	[m/s ²]	gravitaatiokiihtyvyys
h	[€]	hinta
m	[kg/s]	massavirta
p	[Pa]	paine
Δp _v	[Pa/m]	painehäviö
q	[W/m]	lämpövirta
r	[-]	korkokanta

t	[s,min,h,a]	aika
w	[m/s]	nopeus
Φ	[W]	teho
ρ	[kg/m ³]	veden tiheys
α	[-]	vuotoekspONENTTI
λ	[W/m°C]	lämmönjohtavuus
ξ	[-]	kitkakerroin
η	[-]	hyötysuhde

Alaindeksit

r	paluu
s	meno
g	maaperä
i	eristys
u	ulko
sop	sopimus
R	Raappavuorentie
M	Martinkyläntie
pump	pumppaus
pp	perusparannus
ve	vesi
väl	välillinen
yhL	yhteistuotantolämpö

Lyhenteet

ET	Energiateollisuus ry
MT	Muoviteollisuus ry
EHP	Euroheat & Power
IRR	internal rate of return
Mpuk	kiinnivaahdotettu muovisuojakuorijohto
Mpul	muovisuojakuorijohto liikkuvin teräsputkin
NPV	net present value
PE	polyeteeni
PEX	ristisilloitettu polyeteeni
PUR	polyuretaani
ROCOF	rate of occurrence of failures

1 Johdanto

Ajatus kaukolämmön hyödyntämisestä rakennusten ja käyttöveden lämmittämiseen alkoi saada jalansijaa Suomessa 1950-luvulla, kun pääkaupunkiseudulla aloitettiin ensimmäisten kaukolämpöverkkojen rakentaminen (Koskelainen et al. 2006, s. 34). Tämän jälkeen etenkin 1970-luvulta lähtien kaukolämpöalalla on eletty selkeää jatkuvan kasvun aikaa (Wilhelms 2011, s. 5) ja Suomen kylmissäkin ilmasto-olosuhteissa kaukolämpö on osoittautunut käyttövarmaksi ja luotettavaksi lämmitysmuodoksi (Pöyry 2011, s. 1). Nykyisin kaukolämmön osuus lämmitysmarkkinoista on lähes 50 prosenttia (Wilhelms 2011, s. 2) ja suurimmissa kaupungeissa kaukolämpö on saavuttanut jopa yli 90 prosentin markkinaosuuden (Helsingin Energia 2012).

Viime aikoina kaukolämpöverkkojen keskimääräisen käyttöiän noustessa on kuitenkin ollut havaittavissa merkkejä, että jatkuvan kasvun vaiheesta oltaisiin siirtymässä yhä enemmän verkkojen ylläpitovaiheeseen samalla kun perusparannustoiminnan suhteellinen osuus kaukolämpöverkkojen rakennus- ja investointitoiminnasta on ollut hiljalleen nousussa (Energiateollisuus 2008b, s. 1). Kaukolämpöjohtojen lisääntyvä perusparannustarve ei kuitenkaan ole seurausta pelkästään niiden ikääntymisestä, sillä osa vuosikymmeniäkin vanhoista johdoista on säilynyt hyvissä olosuhteissa uudenveroisina (Siitonen 2012). Sen sijaan kaukolämpöverkkojen ollessa yleensä hyvin epähomogeenisia koostuen eri aikoina rakennetuista, rakenteeltaan hyvin erityyppisistä sekä erikokoisista johdoista selittävät usein monet muut tekijät, kuten liikenteen aiheuttama rasitus ja puutteet rakentamisen laadussa, paremmin yksittäisten johto-osuuksien vikaantuvuuksia. (Andersson et al. 1997, s. 10) Sen lisäksi, että vuotojen ilmentyminen on monesti useamman eri osatekijän summa, hankaloittaa niiden ennakointia ja hallitsemista lisäksi kaukolämpöjohtojen maanalainen sijainti, joka vaikeuttaa ja hidastaa vuotojen havaitsemista.

Hyväkuntoisia johto-osuuksia ei ole tarkoituksenmukaista uusia, vaikka ne olisivatkin jo iäkkäitä, vaan rajalliset resurssit kannattaa ohjata kohteisiin, joiden kunto heikentää verkon käyttövarmuutta. Tämä seikka osittain vaikeuttaa perusparannuskohteiden

suunnittelua aiheuttaen epävarmuutta siitä, mitkä johto-osuudet pitäisi perusparantaa ensin ja missä keskinäisessä järjestyksessä.

Tämän diplomityön tavoitteena on määrittää Vantaan Energian kaukolämpöverkon perusparannusvolyymin tavoitteellinen taso ja tarvittava budjetti, joilla pystyttäisiin turvaamaan ja säilyttämään verkon käyttövarmuus tulevaisuudessa. Tavoitetasojen arvioimisen lisäksi tarkoituksena on pohtia ja määritellä kriteereitä, joiden tulisi ohjata perusparannuskohteiden valintaa ja keskinäistä uusimisjärjestystä.

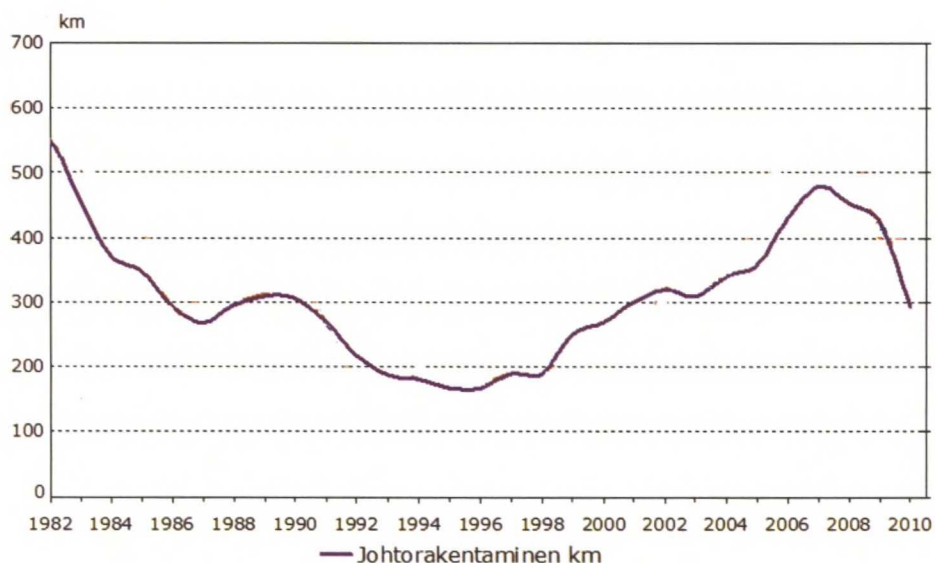
Koska kaukolämpölinjojen perusparantaminen on aina taloudellisesti mittava investointi, on työn loppupuolella tutkittu myös johtojen uusimisen taloudellista kannattavuutta ottaen huomioon perusparantamiseen liittyvät säästöpotentiaalit, kuten pienenevät lämpöhäviöt ja korjauskustannukset. Työssä on myös teoreettisesti lähestytty ajatusta taloudellisesti optimaalisen perusparannusajankohdan löytämisestä ennakoidessa johtojen huonokuntoisuudesta ja vaurioiden korjauksista koituvia kumuloituvia menoja. Tähän kysymykseen ei kuitenkaan tämän työn puitteissa ja itse laskelmissa ole tarkemmin otettu kantaa.

2 Kaukolämpöverkko

Kaukolämpö on Suomen yleisin lämmitysmuoto, joka on käytössä lähes kaikissa kaupungeissa ja taajamissa. Vuonna 2010 asuin- ja palvelurakennusten lämmitystarpeesta noin 46 % katettiin kaukolämmöllä (Wilhelms 2011) ja suurimmissa kaupungeissa kaukolämmön markkinaosuus kohoaa jopa yli 90 prosentin (Helsingin Energia 2012).

Kaukolämpöjärjestelmässä lämpö tuotetaan erillisissä lämmityslaitoksissa, joista se siirretään kaukolämpöverkon putkissa virtaavan veden välityksellä kaukolämpöasiakkaille. Lämmin kaukolämpövesi luovuttaa lämpönsä ja jäähtyy asiakkaan kiinteistön lämmönsiirtimissä, joista se palaa takaisin lämmöntuotantolaitokselle uudelleen lämmitettäväksi. Vesi saadaan virtaamaan kaukolämpöverkossa lämmityslaitosten pumppujen sekä tarvittaessa erillisten paineenkorotuspumppujen avulla, joita voidaan käyttää niin meno-, kuin paluupuolellakin. Verkon toiminnan ja käytön kannalta olennaisia komponentteja ovat myös kaukolämpöverkkoon asennetut erilaiset venttiilit, joita tarvitaan liitos-, muutos- ja korjaustöiden suorittamiseksi sekä isoissa verkoissa myös aluejako- ja säätötoimintojen suorittamiseksi (Koskelainen et al. 2006, s. 43–45 ja 167).

Suomessa kaukolämpöverkkojen rakentaminen alkoi pääkaupunkiseudulta 1950-luvulla (Koskelainen et al. 2006, s. 34), mutta nykyisin kaukolämpöpaikkakuntia on ympäri Suomen jo yli 170 kappaletta. Vuoden 2010 lopulla kaukolämpöverkkojen yhteenlaskettu pituus oli Suomessa 12 600 km ja verkoston avulla kaukolämpöasiakkaille siirrettiin lämpöä vuoden aikana yhteensä noin 35 900 GWh. (Energiateollisuus 2011c, s. 7-8) Verkon uudisrakentaminen on ollut erityisen aktiivista 1980-luvun taitteessa, jolloin parhaimmillaan uutta johtoa rakennettiin noin 550 km vuodessa. 1990-luvun puolivälissä taas rakentaminen hiipui alimmilleen viimeisten kolmenkymmenen vuoden aikana, kunnes lähti taas nousuun 2000-luvulle tultaessa. Viime vuosina verkko on laajentunut voimakkaasti ja esimerkiksi vuonna 2007 verkko laajeni lähes 500 kilometrillä. Kuvasta 1 nähdään, kuinka uudisrakentaminen on kehittynyt 1980-luvun alkupuolelta vuoteen 2010.



Kuva 1 Kaukolämpöverkon vuotuisen uudisrakentamistahti Suomessa vuodesta 1982 lähtien.
Lähde: Wilhelms 2011, s. 7

Verkon ikääntymisestä huolimatta perusparannus- ja korjauskilometrejä on Suomessa viime vuosina kertynyt kaiken kaikkiaan vain noin 30–40 johtokilometriä vuodessa. Tämänhetkisellä perusparannustahdilla Suomen nykyinen kaukolämpöverkko olisi siten perusparannettu kertaalleen 315–420 vuodessa. Ottaen huomioon, että kaukolämpöjohdoilta edellytetty elinikä on käyttölämpötiloista riippuen enimmilläänkin 50 vuotta, kertoo tämä siitä, että nykyisen tahdin riittävyyden tarkistaminen ja arvioiminen verkkojen käytettävyyden varmistamiseksi olisi aiheellista. (Sirola 2011, s. 2 & Wilhelms 2011, s. 7)

2.1 Kaukolämpöjohdot

Rakentamisessa käytetyt kaukolämpöjohdot ovat Suomen monen vuosikymmenen kaukolämpöhistorian aikana ehtineet kehittyä niin rakenteellisesti kuin materiaalistikin. Perusidealtaan johtojen rakenne on kuitenkin säilynyt samana: yleisesti ottaen kaukolämpöjohto rakentuu virtausputkesta, sitä ympäröivästä eristeestä sekä suojakuoresta/kanavasta (Andersson et al. 1999, s. 11). Virtausputki voi olla teräksinen, muovinen tai kuparinen. Eristemateriaaleista polyuretaanilla (PUR) on tällä hetkellä dominoiva markkina-asema, vaikkakin myös muita muovisekoitteita on kehitteillä ja kokeiluasteella (Zinko et al. 2008, s. 43). Entisaikaan betonikanavien virtausputkien

eristemateriaalina on käytetty etenkin mineraalivillaa, mutta myös polyuretaanikouruja ja kevytbetonia (Nuutinen 2011, s. 15). Kaukolämpöjohtojen suojakuoret valmistetaan nykyään polyeteenistä, mutta aikaisemmin etenkin suurempien virtausputkien suojakuoret valettiin betonista. Tänä päivänä kaukolämpöputkia on saatavana varustettuina lisäksi myös sisäänrakennetuilla kosteudenvälvontajohtimilla, joiden avulla voidaan seurata johdon kuntoa ja kosteuden pääsemistä eristeeseen. Normaleissa käyttökohteissa ja -olosuhteissa johtoelementeiltä vaaditaan vähintään 30 vuoden käyttöikää käyttölämpötilan ollessa 120 °C ja alle 115 °C:een käyttölämpötilassa käyttöikävaatimus on yli 50 vuotta. (Koskelainen et al. 2006, s. 137 ja 142)

Edellä mainittujen rakenteellisten ja materiaalisten eroavaisuuksiensa puolesta kaukolämpöjohdot ovat jaoteltavissa eri johtotyyppeihin, jotka jo ominaisuuksiensa vuoksi ovat esimerkiksi eri tavoin alttiita vaurioitumiselle. Rakenteensa perusteella johdot on jaoteltavissa:

- betonirakenteisiin ja
- muovisuojakuorijohtoihin.

Lisäksi jaottelukriteerinä käytetään teräksisen virtausputken mahdollisuutta liikkua eristeen sisällä. Betonikanavarakenteisissa johdoissa virtausputket pääsevät aina liikkumaan vapaasti, mutta muovisuojakuorijohdot voivat olla rakenteeltaan niin vapaasti liikkuvia kuin kiinnivaahdotettujakin. Nämä kriteerit yhdistämällä voidaan kaukolämpöjohdoista muodostaa viisi alla lueteltua johtoryhmää (Pirvola 1996, s. 18):

1. betonielementtikanavajohdot (Emv, Epu, Epuk, Wmv)
2. vapaastiliikkuvat muovisuojakuorijohdot (Mpul, 2Mpul)
3. kiinnivaahdotetut muovisuojakuorijohdot (Mpuk, 2Mpuk)
4. muovi- ja kupariputkilla varustetut kaukolämpöjohdot (taipuisat johto-rakenteet)
5. muut johtorakenteet, kuten esimerkiksi sisäjohdot ja asbestisementti-suojaputkijohdot (Ekb, Ymv, Tkb, Tmv, Pkb, Pmv, Kkb, PPkb, ILmv, Amv, 2Amv, puA, 2PuA, Apu, 2Apu).

Johtojen nimilyhenteiden kirjainten selitteet ovat (Koskelainen et al. 2006, s. 137):

Suojakuoret

E = kokoelementtikanava

W = kolmitukinen elementtikanava

M = muovisuojaputki

T = työpaikalla valettava suorakulmainen kanava

Y = yläelementtikanava

P = puolielementtikanava

A = asbestisementtisuojaputki

Lämpöeristeet

mv = mineraalivillakouru

pu = polyuretaanivaaho

pe = vaahdotettu polyeteeni

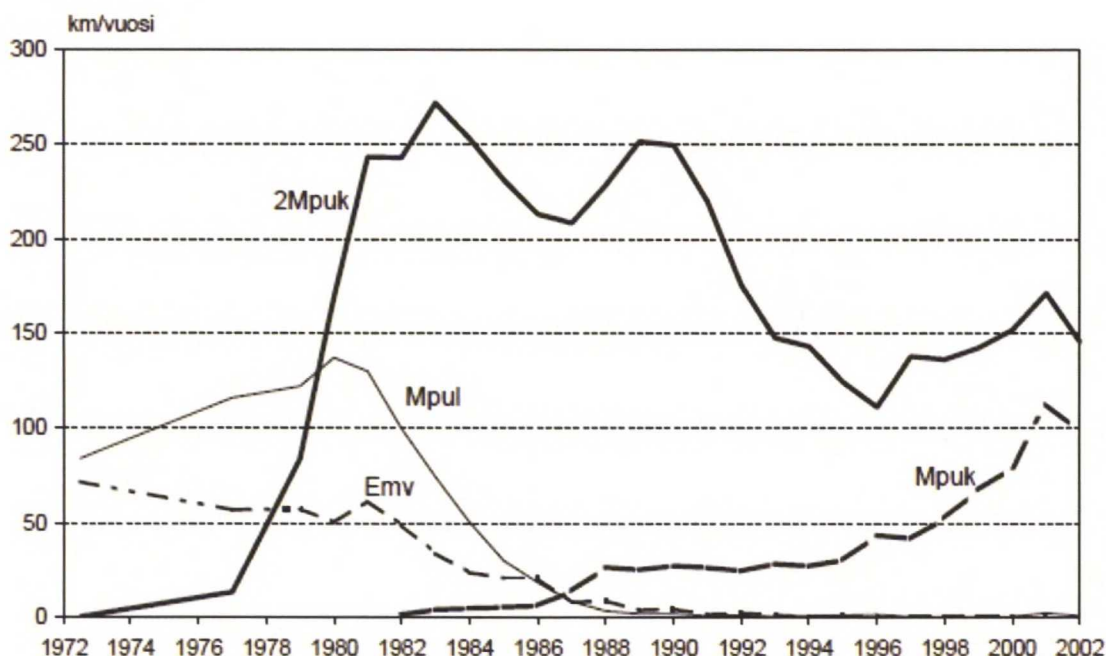
kb = kevytbetoni

Rakenne

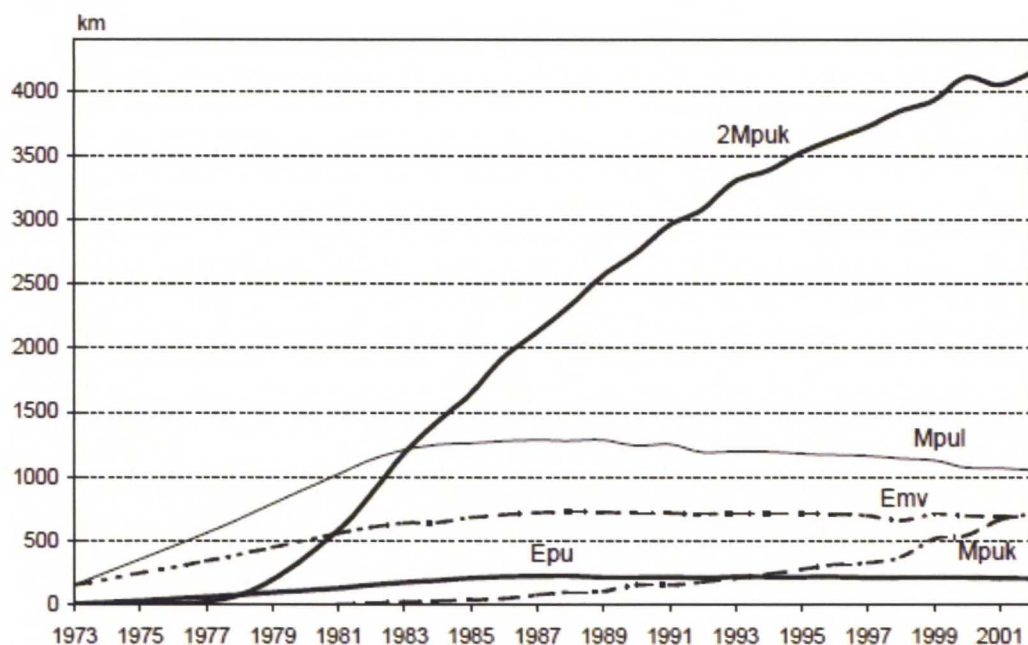
k = putket kiinni eristyksessä

l = putket liikkuvat

Suomessa vanhimmat kaukolämpöjohdot ovat betonikanavarakenteisia, mutta jo 1980-luvun puolivälissä alkoi uudisrakentamisessa siirtymä kiinnivaahdotettujen putkien aikakauteen. Nykyisin rakentamisessa käytetään lähes yksinomaan kiinnivaahdotettua rakennetta. Vapaastiliikkuvaa muovisuojakuorirakennetta käytettiin rinnan kiinnivaahdotettujen kanssa 1980-luvun puoliväliin asti, minkä jälkeen sen käyttö rajoittui suppeisiin perusparannus- ja korjauskohteisiin. (Pirvola 1996, s. 18) Kuvasta 2 on nähtävissä yleisimpien kaukolämpöjohtotyyppien rakentamismäärien kehitys ajanjaksolla 1972–2002 ja kuvassa 3 on taas esitetty yleisimpien kaukolämpöjohtorakenteiden kokonaispituuksien kehitys vuoteen 2001 asti. Kuvan 3 perusteella voidaan sanoa, että jo vuonna 2001 kiinnivaahdotettujen johtojen osuus oli Suomen kaukolämpöverkkojen yhteenlasketusta pituudesta huomattavan suuri. Tulevaisuudessa kiinnivaahdotettujen johtojen osuus tulee edelleen kasvamaan niin uudisrakentamisen kuin perusparantamisen myötä, kun vanhoja johtorakenteita nykyaikaistetaan. (Pirvola 1996, s. 32). Johtorakenteiden nykyaikaistamisella saavutettavia hyötyjä ovat pienemmät lämpöhäviöt sekä kaukolämpöverkon yhtenäisempi rakenne. Lisäksi vanhojen rakenteiden eriste-elementtien ja muiden johtosien huono saatavuus ohjaa nykyaikaisten kiinnivaahdotettujen johtojen käyttöön. (Energiateollisuus 2008b, s. 1 ja Pirvola 1996, s. 29)



Kuva 2 Yleisimpien kaukolämpöjohtorakenteiden rakentaminen Suomessa v. 1972 - 2002. Lähde: Suomen kaukolämpö ry 2003b, s. 15



Kuva 3 Yleisimpien kaukolämpöjohtorakenteiden kokonaispituudet Suomessa v. 1973 - 2002. Lähde: Suomen kaukolämpö ry 2003b, s. 16

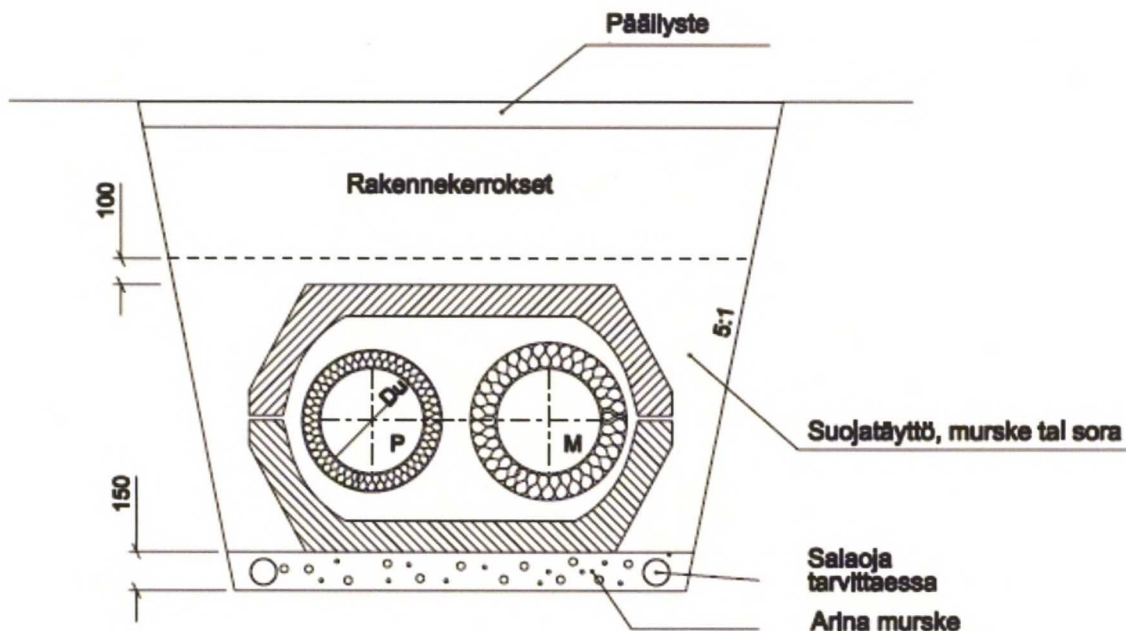
Suomessa kaukolämpöenergian siirtoon käytetään kaksiputkijärjestelmää, jossa kaukolämpöjohto koostuu yhdestä meno- ja yhdestä paluuputkesta (Koskelainen 2006, s. 137). Johdot on tapana kategorioida käyttötarkoituksensa mukaan siirtojohtoihin,

jakelujohtoihin ja liittymisjohtoihin. Siirtojohdot ovat pääjohtoja, joiden avulla kaukolämpö siirretään lämmöntuotantolaitokselta kulutusalueelle. Niiden virtausputkien koko vaihtelee välillä DN 100-DN 800. Siirtojohdoista haarautuu jakelujohtoja, jotka siirtävät kaukolämmön kulutusalueen yksittäisten kuluttajien lähetyville. Jakelujohtojen virtausputkien halkaisijat ovat väliltä DN 40-DN 300. Liittymisjohtoja kutsutaan myös talojohdoiksi ja ne haaroitetaan kulutusalueen jakeluverkosta yksittäisten kuluttajien lämmönjakohuoneisiin. Talohaaroissa käytettävät virtausputket ovat yleensä kooltaan DN 20-DN 100. (Energiateollisuus 2005, s. 12) Siirtojohdot ovat lämmöntoimituksen kannalta kriittisimpiä, koska ne siirtävät kokonsa puolesta suurempia tehoja, jolloin niiden rikkoutuminen voi johtaa laajoihin lämmönjakelun häiriöihin.

2.1.1 Betonielementtikanavajohdot

Betonikanavajohtoja on rakennettu Suomessa 1950-luvulta 1990-luvun alkuun saakka (Suomen kaukolämpö ry 1999, s. 6). Ne ovat kooltaan tyypillisesti yli DN 250 siirtojohtoja ja usein verkon johtojen tärkeysluokituksessa korkealla (Pirvola 1996, s. 38). Suomessa yleisimmin käytetty betonikanavajohtorakenne on kokoelementtikanava (Emv), joka on koottu tehdasvalmisteisista betonielementeistä (Koskelainen et al. 2006, s. 144).

Betonikanavajohtojen virtausputkina on käytetty teräsputkia, jotka lepäävät betonikuoren sisällä kannakkeiden varassa. Kanavien seinien ja virtausputkien välissä on riittävä tila eristemateriaalia ja tuuletusta varten. Eristemateriaalina on käytetty pääosin mineraalivilla- tai polyuretaanikouruja. Uretaanikourut ovat käyttökokemusten myötä osoittautuneet huonoiksi lämmöneristeiksi. Niillä on lisäksi taipumus käyristyä kastumisen seurauksena. (Koskelainen et al. 2006, s. 144) Eristeen muodonmuutokset johtavat helposti siihen, etteivät ne enää suojaa virtausputkea tasaisesti koko matkalta. Kuvasta 4 nähdään kokoelementtikanavan periaatteellinen poikkileikkauskuva.



Kuva 4 Poikkileikkauskuva betonielementtikanavasta. Lähde: Suomen kaukolämpö ry 2003a, s. 41

2.1.2 Vapaastiliikkuvat muovisuojakuorijohdot (Mpul ja 2Mpul)

Vapaastiliikkuvien muovisuojakuorijohtojen rakentaminen aloitettiin Suomessa 1960-luvun puolivälissä ja ne olivat yleisesti käytössä noin 20 vuoden ajan (Koskelainen et al. 2006, s. 147). Puhekielessä niistä käytetään myös varsin yleisesti termejä 'fiskars' tai 'fiskhaterm' (Siitonen 2012). Tyypillisesti fiskars-johtoja on käytetty kooltaan alle DN 200 suuruisina jakelujohtoina (Pirvola 1996, s. 47).

Vapaastiliikkuvissa muovisuojakuorijohdoissa virtausputket on asennettu kanavarakenteeseen, jonka muodostavat polyuretaanieristeellä kiinteästi yhteen liitetty polyeteenisuojakuori ja virtausputkien lasikuituiset suojaputket. Tällöin virtausputket pääsevät vapaasti liikkumaan lämpöliikkeen vaikutuksesta. Lisäksi rakenteeseen kuuluu erillinen vuotovesiputki, jonka pitäisi teoriassa ohjata suojakuoren sisään päässyt vesi poistumaan rakenteista. Suomessa tästä johtotyypistä on rakentamisessa pääasiassa suosittu rakennetta, jossa sekä meno- että paluuputki on sijoitettu saman suojakuoren sisään (Mpul) (kuva 5). Rakenteesta on kuitenkin myös käytetty ratkaisua, jossa meno- ja paluuputket on vedetty maahan erillisinä putkina (2Mpul). (Koskelainen et al. 2006, s. 145)



Kuva 5 Poikkileikkaus Mpul-rakenteesta. Lähde: Nuutinen 2011, s. 22

Suomessa vapaastiliikkuvat muovisuojakuorijohdot ovat olleet keskeisin korjaus- ja perusparantamistoiminnan kohde. Rakenteen perusongelmana on ollut muovisuojakuoren liitosrakenteen pettäminen esimerkiksi maanpainumisen seurauksena, jolloin elementin painumisen myötä kutisteliitos on auennut. Tällöin ulkopuolinen vesi pääsee teräsputken pinnalle syövyttämään teräsputken pintaa. (Suomen kaukolämpö ry 1999, s. 5) Rakenteeseen kuuluvasta vuotovesiputkesta huolimatta vesi ja korroosio pääsevät usein leviämään ja tuhoamaan putkea pitkältikin matkalta (Koskelainen et al. 2006, s. 145).

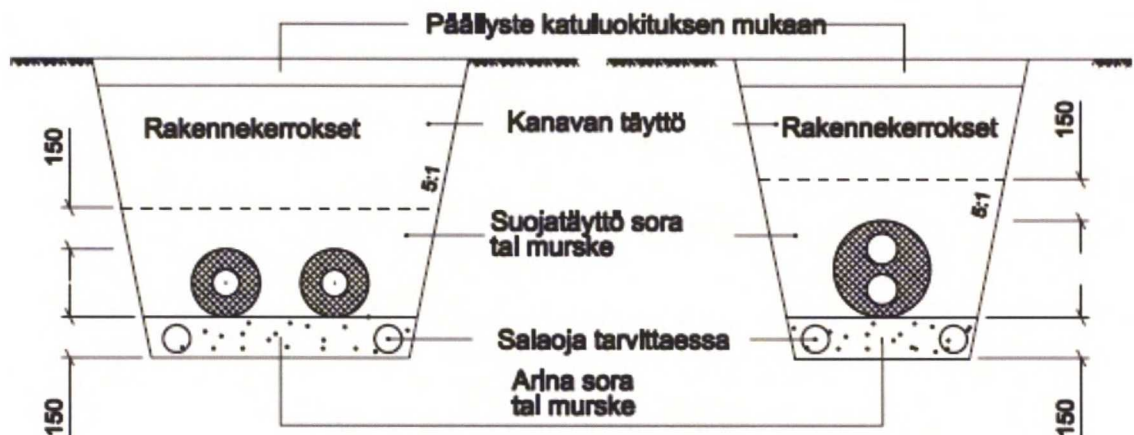
2.1.3 Kiinnivaahdotetut muovisuojakuorijohdot (Mpuk ja 2Mpuk)

Kiinnivaahdotettujen kaukolämpöjohtojen käyttö aloitettiin Suomessa 1970-luvun puolivälissä, jolloin ne alkoivat nopeasti syrjäyttää muiden johtorakenteiden käyttöä. 1980-luvun puolivälin jälkeen se on ollut melkein ainoa käytetty johtorakenne uudisrakentamisessa. (Koskelainen et al. 2006, s. 138)

Kiinnivaahdotetussa rakenteessa virtausputki ja polyteenisuojakuori on liitetty kiinteästi yhteen polyuretaanieristeellä. Eri valmistajien valmistamat elementit ovat

keskenään yhteensopivia ja rakentamista varten on saatavilla täydellinen osavalikoima liitostarvikkeineen. Tämä helpottaa sekä suunnittelua että rakentamista. Kun osien valmistus on lisäksi mahdollista suorittaa optimaalisissa ja valvotuissa tehdasolosuhteissa, voidaan niitä lähtökohtaisesti pitää laadultaankin parempina kuin työmaalla vaihtelevissa sääolosuhteissa itse valmistettuja komponentteja. Nykyisin johtojen rakenne, mitat ja tekniset vähimmäisvaatimukset on yhtenäistetty Euroopassa standartein. (Koskelainen et al. 2006, s. 138 & Suomen kaukolämpö ry 1999, 6 & Randlov 1997, s. 25–28)

Kiinnivaahdotettua rakennetta hyödynnetään niin yksiputki- (2Mpuk) kuin kaksiputkijohdoissakin (Mpuk). 2Mpuk-johdossa on erilliset meno- ja paluuputket, kun taas Mpuk-johdossa putket on liitetty kiinteästi yhteen saman suojakuoren sisään. 2Mpuk-johtoa valmistetaan yleensä kokoluokassa DN 20-DN 600, mutta tarvittaessa kokoon DN 1200 asti. Mpuk-johtoa on taas yleisesti saatavilla kokoluokissa DN 2x20 - DN 2x200. (Koskelainen et al. 2006, s. 139) Kuvassa 6 on esitetty tyyppipiirustukset 2Mpuk- ja Mpuk-johdoista.



Kuva 6 Kiinnivaahdotettujen kaukolämpöjohtojen tyyppipiirustukset. Lähde: Suomen kaukolämpö ry 2003a, s. 41

2.1.4 Muut rakenteet

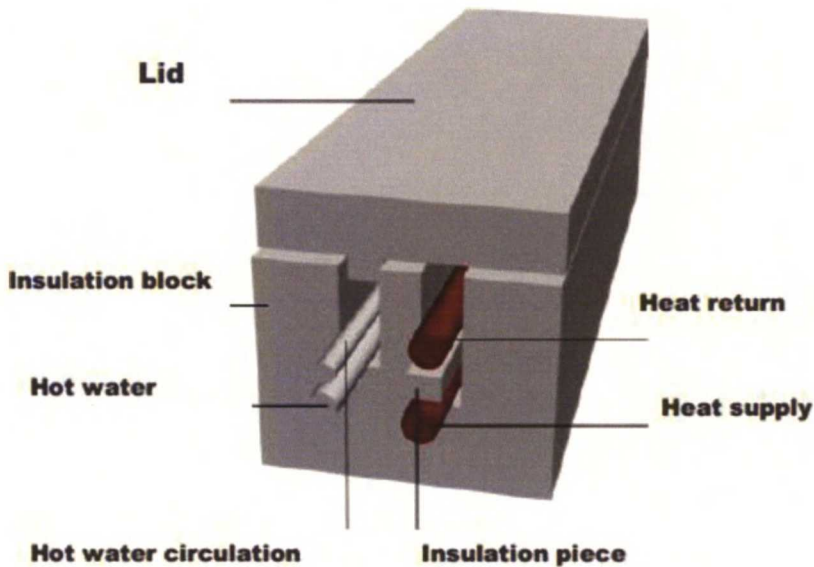
Erikoisjohtoja rakennetaan tunneleihin, siltoihin, vesistön- ja radanalituksiin ym. erikoisolosuhteisiin. Näissäkin kohteissa on kuitenkin usein käytössä normaalit

kiinnivaahdotetut putket, jotka on varustettu erityyppisillä kannatus- tai ripustuskomponenteilla. (Koskelainen et al. 2006, s. 145)

Kokonaan oman laajan ryhmänsä muodostavat kellarijohdot, joissa teräsputket kulkevat kattorakenteissa pääosin tehdasvalmisteisten kannakkeiden varassa. Eristeenä kellarijohdoissa käytetään mineraalivillaa, joka suojataan kiinteistön muuhun putkistoeristykseen sopivalla muovilla, pellillä tai alumiinipaperilla. (Koskelainen et al. 2006, s. 145)

Maahan on myös yhä kaivettuna jossain määrin vanhoja asbestisuoja-putkijohtoja, joissa on käytetty polyuretaani- tai mineraalivillaeristettä. Asbestisuoja-putkijohtojen käyttö loppui 1980-luvulla asbestiin liittyvien ongelmien ja kiinnivaahdotettujen johtojen markkinoille ilmestymisen myötä. (Koskelainen et al. 2006, s. 145)

Tänä päivänä energiansäästö on paljon keskustelua nostattava puheenaihe ja kaukolämmönsiirron puolellakin on tehty kehitystyötä siirtoratkaisujen kehittämiseksi ja lämpöhäviöiden pienentämiseksi. Uusimpia ajatuksia edustavat esimerkiksi putkisysteemit, joissa saman suojakuoren sisään on sijoitettu kolme virtausputkea, yksi paluu- ja kaksi pienempää menoputkea. Ratkaisu mahdollistaa toisen menoputken poissulkemisen kesäaikaan, kun lämpöä tarvitaan vähemmän, jolloin pienempien putkidimensioiden ansiosta lämpöhäviöt ovat pienemmät. Toisaalta kaikkien putkien ollessa käytössä lämpöhäviöt ovat suuremmat kuin perinteisessä järjestelmässä. Ainakin Ruotsissa on perinteisen järjestelmän rinnalle on kokeiltu myös niin kutsuttua EPSPEX-järjestelmää, jossa ristosilloitetusta polyeteenistä (PEX) valmistetut virtausputket on sijoitettu polystyreenistä (EPS) tehtyyn eristelaatikkoon (kuva 7). EPSPEX-järjestelmän investointikustannukset ovat usein matalammat kuin perinteisessä systeemissä ja myös lämpöhäviöt ovat pienemmät. Järjestelmän hyödyntäminen edellyttää, että paineet ja lämpötilat ovat tarpeeksi matalat PEX:n käyttöön. (Zinka et al. 2008, s. 41 ja 58)



Kuva 7 ESPSEX-putkijärjestelmä. Lähde: Zinko et al. 2008, s. 58

2.2 Muovisuojaakuorijohtojen liitosratkaisut

Kaukolämpöjohtojen liitokset ovat vauriotilastojen perusteella verkon heikoin lenkki (Energiateollisuus 2011d, s. 3), jotka muodostavat erityisen riskitekijän ulkopuolisen veden pääsyle rakenteisiin ja syövyttämään teräksiset virtausputket puhki (Pulakka 1987, s. 2). Vuotojen syntymisen kannalta liitoksista tekee riskialttiita erityisesti se, että ne aiheuttavat verkkoon epäjatkuvuuskohtia. Lisäksi ne joudutaan aina valmistamaan työmaalla vaihtelevissa ja haastavissakin olosuhteissa, kun taas itse kaukolämpöjohdot sekä muut valmisosat on mahdollista valmistaa valvotusti tehtaiden sisätiloissa (Huntsman 2000, s. 2).

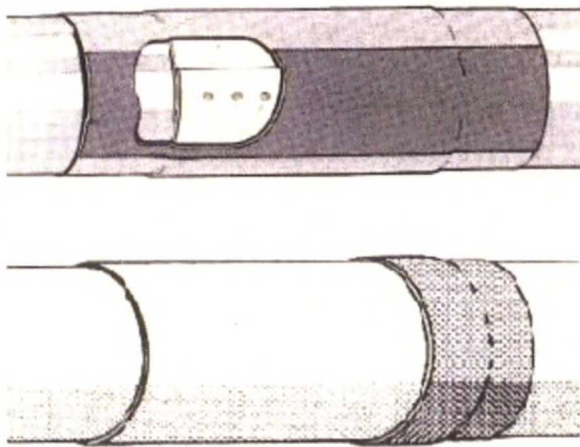
Kaukolämpöjohtojen suojakuoriliitosten tiiviyn merkitys korostuu erityisesti kiinnivaahdotettujen muovisuojaakuorijohtojen tapauksessa (Räsänen 1984, s. 1), sillä niiden rakenteisiin tunkeutunut vesi ei pääse poistumaan, ja riski veden pääsystä eristeiden läpi virtausputkille on suuri. Tuulettuvien betonielementtikanavajohtojen kohdalla suojakuoren tiiveysvaatimukset eivät ole aivan yhtä ehdottomia. Vaikka tuulettuvat kanavarakenteet on mahdollisuuksien mukaan pyritty rakentamaan mahdollisimman vesitiiviiksi, niin ulkopuolisella vedellä on kuitenkin taipumus löytää reittinsä kanavan sisäpuolelle vettä läpäisevän betonin tai vuotavien elementtisaumojen lävitse. Teoriassa kosteuden olisi kuitenkin tarkoitus kulkeutua kalteviksi rakennettu

kanavia pitkin verkon tyhjennyskaivoihin ja poistua tuuletuksen mukana ulos. (Torri 2008, s. 5) Betonielementtikanaviin on myös monesti rakennusvaiheessa tehty salaojituksia, joiden avulla kanaviin päässyttä vettä saadaan poistumaan, ennen kuin vesi ehtii vaurioittamaan virtausputkia (Vaittinen 1987, s. 4).

Suomessa nykyisin rakennettavista kaukolämpöjohdoista lähestulkoon kaikki ovat rakenteeltaan muovisuojuakuorellisia kiinnivaahdotettuja johtoja (Sirola 2012). Näiden johtoelementtien liitoskohtien pääperiaatteellinen rakenne koostuu teräksisten virtausputkien hitsausliitoksesta, virtausputkea ympäröivästä polyuretaanieristeestä sekä eristettä suojaavasta suojakuoriliitososasta, josta käytetään usein myös termiä ”muhvi”. (Rengholt 2003, s. 26) Suojakuorien yhteenliitosta varten on olemassa useita liitosmenetelmiä, jotka on jaoteltavissa (Koskelainen et al. 2006, s. 141):

- kutisteliitoksiin,
- hitsausliitoksiin sekä
- mekaanisiin liitoksiin.

Kutisteliitoksissa suojakuorijatkos saadaan aikaan kuumentamalla jatkoskohdan ympäri asetettua liimapintaista kutistemuhvia kuumalla liekillä, jolloin se kuumentuessaan kutistuu sekä tarraa kiinni pintaan. Muhvien alla käytetään yleensä mekaanisena tukena joko saumattomia muoviholkkeja tai saumallisia jatkospeltejä, jotka myös muodostavat teräsputkihitsausliitoksen ympärille onton tilan polyuretaanieristeen vaahdotusta varten. Saumaton muoviholkki on ujutettava ennen teräsputkien hitsausta toisen kaukolämpöjohdon päälle, minkä jälkeen se voidaan vetää pienen välyksen avulla keskeisesti liitoskohdan ympäri. Koska holkki on pituussuunnalta saumaton, riittää tällöin, että kutistepalat asennetaan vain holkin päihin. Jatkospelti on puolestaan kiinnitettävä ensin pituussaumastaan matalakantaisilla ruuveilla ja asennettava kutistemuhvi peittää sen koko pituudeltaan. Lopputuloksena molemmissa tapauksissa pitäisi kuitenkin olla tiivis, ilmaton ja tasainen pinta. (Logstor 2008, s. 159–167 & Energiateollisuus 2010, s. 9-12) Kuvassa 8 yläpuolella on kutisteliitos peltijatkoksella ja alapuolella kutisteliitos holkkijatkoksella.



Kuva 8 Kutisteliitokset pelti- (yllä) ja holkkijatkoksella (alla). Lähde: Koskelainen et al. 2006, 142

Sähköhitsausmuhveissa on sisäänrakennettu metallinen vastuslanka, joka lämpiää, kun lanka kytketään virtalähteeseen. Lämmettyään se sulattaa ympärillään olevan polyuretaani (PE) -materiaalin, joka laajenee aiheuttaen samalla putken ja muhvin välisen hitsauspaineen. (Muoviteollisuus ry 2011, s. 6-8) Muhvien sähköhitsauksen avulla on mahdollista aikaansaada hyvin tasalaatuinen ja kestävä liitos. Osa valmistajista jopa markkinoi hitsauslaitteistollaan voitavan valmistaa liitoksia, jotka kestävät käytössä yhtä kauan kuin kaukolämpöjohdotkin. (Mittel 2012) Mekaanisista liitoksista esimerkkinä voidaan mainita teräskourut (Energiateollisuus 2010, s. 13).

Suomessa liitoksista valtaosa on tehty ja tehdään käyttäen kutisteita, mutta suuremmissa putkidimensioissa on siirrytty käyttämään lisäksi etenkin hitsausliitoksia (Sirola 2012).

2.3 Lämmön siirto ja jakelu

Kaukolämpöverkkoa tarvitaan lämmönsiirtoon lämmöntuotantolaitoksilta kaukolämpöasiakkaille sekä jäähtyneen veden kuljettamiseen takaisin tuotantolaitoksille uudelleen lämmitettäväksi. Putkissa siirtyvä lämpöteho riippuu käytettävästä vesivirrasta sekä meno- ja paluuveden lämpötilaerosta seuraavasti (Koskelainen et al. 2006, s. 198):

$$\dot{Q}_L = c_p \dot{m} \Delta T = c_p \rho \dot{V} \Delta T \quad (2.1)$$

jossa Φ_L = lämpöteho [W]
 c_p = veden ominaislämpökapasiteetti [J/kg, °C]
 \dot{m} = veden massavirta [kg/s]
 ρ = veden tiheys [kg/m³]
 \dot{V} = veden tilavuusvesivirta [m³/h]
 ΔT = meno- ja paluulämpötilan erotus eli jäähtytys [°C]

Siirtyvää lämpötehoa voidaan kaavan 2.1 mukaisesti säätää vaikuttamalla vesivirran ja lämpötilaeron arvoihin. Suomessa kaukolämpöjohdot on mitoitettu toimimaan maksimissaan 120 °C:ssa, mutta tyypillisesti menoveden lämpötila vaihtelee ulkolämpötilan mukaan välillä 65 - 115 °C ja paluueden lämpötila välillä 25 - 50 °C. Korkeaa lämpötilaeroa käyttämällä säästetään pumppauskustannuksissa, mutta toisaalta tarpeettoman korkeat lämpötilat johtavat lämpöhäviöiden kasvuun, jolloin lämpöhäviöiden minimoimiseksi käytetään matalampia lämpötiloja. Alhaisempien lämpötilojen käytöstä on taloudellista hyötyä lisäksi silloin, kun lämpö tuotetaan sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa, koska lämpötilan alentaminen lisää voimalaitoksen sähköntuotantokapasiteettia. Korkeat lämpötilat voivat myös muodostua rasitteeksi etenkin osalle verkon komponenteista, kuten polyuretaanieristeisille johdoille, jolloin lämpötilojen laskulla tähdätään lisäksi verkoston eliniän pidentämiseen. (Koskelainen et al. 2006, s. 29, 43–44 ja 137 & Randlov 1997, s. 30) Kiertovesivirran ylärajaa rajoittavat taas käytetyn putken halkaisija sekä sallittu painehäviö (Sirola 1983, s. 3).

3 Kaukolämpöverkon vuodot

Karkeasti jaoteltuna kaukolämpöjohtojen vuodot voivat olla seurausta joko virtausputken sisä- tai ulkopuolisesta syöpymisestä tai muusta syystä aiheutuneesta repeämisestä/murtumisesta. Sisäpuolinen syöpyminen voi esimerkiksi olla seurausta huonosta kiertoveden laadusta, kun taas ulkopuolinen syöpyminen on lähes poikkeuksetta seurausta kaukolämpöverkon pahimman vihollisen, ulkopuolisen veden, aiheuttamasta korroosiosta sen päästyä suojakuoren läpi sisään rakenteisiin. (Kurkela 1987, Pulakka 1987 & Andersson et al. 2007)

Kaukolämpöverkon vuodot aiheuttavat paitsi ongelmia lämpöyhtiöille myös haittaa kaukolämpöasiakkaille niiden korjauksista aiheutuvien lämmöntoimituskatkosten takia. Etenkin vilkkaasti liikennöidyillä alueilla vuotoihin liittyy myös vaara siitä, että joku polttaa itsensä jopa lähes 100-asteiseen kaukolämpövedeen. Vuotojen aiheuttamat seuraamukset vaihtelevat aina tapauskohtaisesti. Esimerkiksi suuren siirtolinjan vaurioituminen keskitalvella on huomattavasti kriittisempää kuin vuoto talohaarassa kesäaikaan. (Kurkela 1987, 1 & Ojansuu 2012)

Tässä luvussa on käsitelty kaukolämpöjohtojen vikaantuvuuteen (vaurioiden lukumäärä per johtokilometri) vaikuttavia tekijöitä, keinoja maanalaisten vuotojen paikantamiseen sekä mahdollisuuksia laatujärjestelmien avulla vaikuttaa vuotojen synnyn ehkäisyyn. Lyhyenä katsauksena on myös tarkasteltu kaukolämpöverkkojen vikaantuvuuksia Suomessa keskimäärin sekä tyypillisimpiä johtovaurioita.

3.1 Johtojen vikaantuvuuteen vaikuttavat tekijät

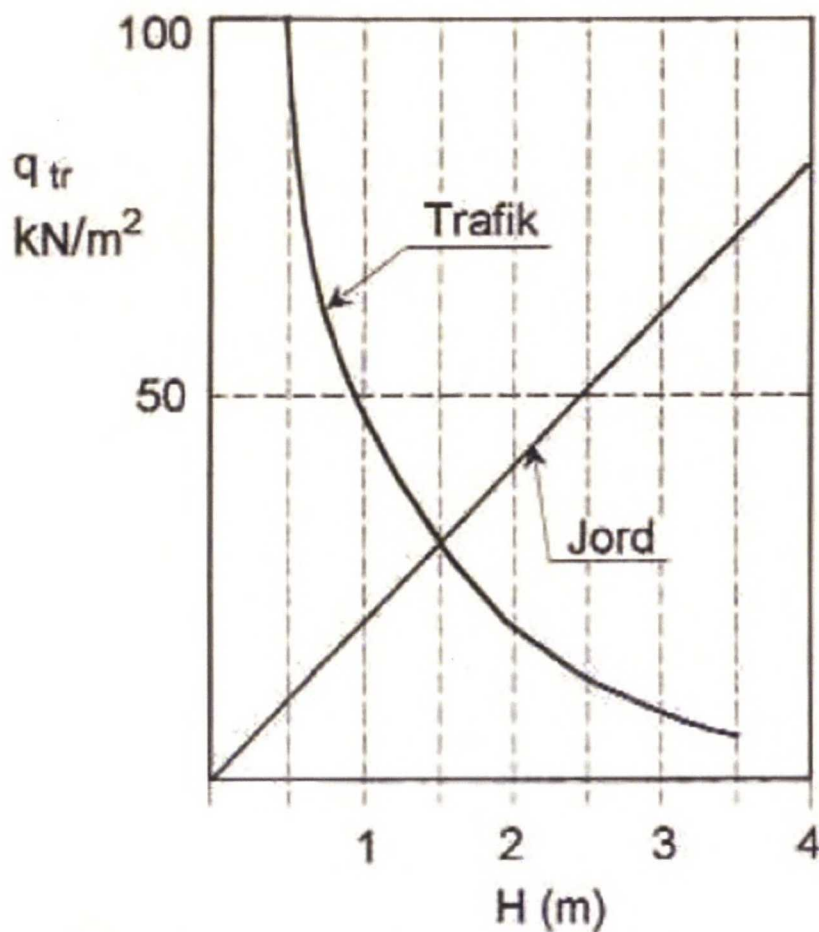
Kaukolämpöjohtojen vikaantuvuuteen vaikuttaa joukko useita niin johtojen sisä- kuin ulkopuolisenkin ympäristön tekijöitä. Johtojen sisäpuoliseen vesikiertoon liittyviksi tekijöiksi voidaan lukea kiertoveden laatu sekä paine ja lämpötila virtausputkessa. Johtojen ulkopuolisessa ympäristössä merkittävimpiä vaikuttimia ovat puolestaan esimerkiksi johtoja ympäröivä maa-aines, pohjavesi sekä maan ja liikenteen aiheuttama

kuormitus. Toisaalta kaukolämpöjohdot itsessään ovat jo ominaispiirteidensä vuoksi eritavalla alttiita vaurioille. (Andersson et al. 1997, s. 10)

Alla olevissa kappaleissa on käyty yksityiskohtaisemmin läpi edellä luoteltujen tekijöiden vaikutuksia vikaantuvuuteen. Vikaantuvuuteen liittyvien syy-seuraussuhteiden tunnistaminen ja havaitseminen voivat osaltaan auttaa ennalta tunnistamaan johto-osuuksia, jotka ovat erityisesti alttiita vaurioille ja joiden uusiminen tulee ajankohtaiseksi keskimääräistä aikaisemmin. Kaukolämpöjohtojen vikaantuvuuksien laskeminen sekä niiden kehityksen seuraaminen ovat puolestaan osaltaan hyödyllisiä indikaattoreita kuvaamaan kaukolämpöjohtojen perusparannustarvetta.

3.1.1 Maaperä ja liikenne

Kaukolämpöjohtoja ympäröivä maa-aines sekä niiden yläpuolinen liikenne aiheuttavat johdoille kuormitusta, joka riippuu ratkaisevasti johtojen peittosyvyydestä. Maaperän aiheuttama kuorma kasvaa likipitään lineaarisesti peittosyvyyden funktiona, kun taas liikenteen aiheuttama kuormitus pienenee (kuva 9). (Andersson et al. 1997, s. 11)



Kuva 9 Maaperän ja liikenteen aiheuttamat kuormitukset kaukolämpöjohtoille peittosyvyyden funktiona. Lähde Andersson et al. 1997, s. 11

Koska kaukolämpöjohdot sijaitsevat yleensä noin 0,6-1 metrin syvyydessä, kuormittaa liikenne kuvan 9 mukaisesti johtoja yleensä ottaen maaperän painoa enemmän. Käytännössä pelkkä peittosyvyys yksinään ei kuitenkaan riitä kuvaamaan maaperän ja liikenteen aiheuttamaa rasitusta. Esimerkiksi liikenteen aiheuttama kuormitus riippuu paljon liikenteen voimakkuudesta ja maaperän kuormitus puolestaan johtoja ympäröivistä maalajeista. Johtoja lähinnä oleva maa-aines on yleensä hiekkaa tai soraa, joilla on hyvä kantokyky. Muu kaivannon täyttöön käytetty maa-aines saattaa sen sijaan vaihdella savesta tai muista irtonaisista orgaanisista maalajeista kiinteään moreeniin ja kalliioon, joiden kantokyvyn vaihdellessa huomattavasti myös johtojen kuormittuneisuus vaihtelee. (Andersson et al. 1997 s. 10–12) Ympäristön kaukolämpöjohtoihin aiheuttama kuorma ei yleensäkään pysy vakiona, vaan voi vaihdella suurestikin ajan kuluessa. Esimerkiksi tielinjausten muuttuessa voivat kuormitukset muuttua radikaalisti. (Andersson et al. 1999, s. 34).

Eri johtorakenteista erityisesti betonielementtikanavat ovat alttiita ympäristöstä tuleville kuormituksille. Pohjan muodonmuutokset, tavallisimmin painumat, aiheuttavat kanavarakenteen saumojen ja liitosten avautumista, jolloin ulkopuolinen vesi pääsee tunkeutumaan esteettömästi putkieristykseen (Vaahtola 1984, s. 1). Kokemuksen perusteella betonielementtikanavat ovat myös muita johtorakenteita alttiimpia raskaan liikenteen aiheuttamalle tärinälle ja kuormitukselle (Siitonen 2012).

3.1.2 Pohjavesi

Pohjavesi on riskitekijä kaukolämpöjohtojen eristeiden kastumiselle etenkin alueilla, joilla se on luonnostaan korkealla. Toisaalta myös esimerkiksi huonosti vettä läpäisevät maalajit kasvattavat riskiä pohjavesivahingoille etenkin kovien sateiden ja lumien sulamisen aikoihin, vaikka normaali pohjavesitaso olisikin kaukolämpöjohtojen sijaintikorkeutta alempana. Keino ehkäistä pohjaveden aiheuttamia ongelmia on salaojien asentaminen kaukolämpöjohtokaivantoihin niiden pysymiseksi kuivana. (Suomen kaukolämpö ry 2003a, s. 24 & Andersson et al. 1999, s. 37)

3.1.3 Kiertoveden laatu

Suomessa kaukolämpöjohtojen kiertovesi on hyvälaatuista, eikä juuri aiheuta sisäpuolisia korroosio-ongelmia (Koskelainen et al. 2006, s. 360). Esimerkiksi vuonna 2010 Suomessa raportoituihin sattuneisiin vain kolme sisäpuolisen syöpymän aiheuttamaa vuotoa (Energiateollisuus 2011d, s. 4). Vertailun vuoksi mainittakoon, että esimerkiksi entisessä Neuvostoliitossa jopa kaksi kolmasosaa kaikista korroosioaurioista olivat peräisin virtausputkien sisäpuolisesta korroosiosta (Andersson et al. 1999, s. 43). Useimmiten kiertoveden aiheuttamat ongelmat liittyvät sen sijaan esimerkiksi lämpöenergiamittareiden magneettisten virtausanturien toimintaan, sillä mittaustarkkuus huononee ajan myötä epäpuhtauksien kertyessä mittarien pinnoille (Koskelainen et al. 2006, s. 360).

Kaukolämpöputkien sisäpuolisen korroosion ja muiden käyttöhäiriöiden aiheuttajia ovat veteen liuenneet kaasut (lähinnä happi ja hiilidioksidi), liian korkea tai liian alhainen

pH-arvo, eräät liuenneet suolat (kuten kloridit), sekä saostumia muodostavat yhdisteet (esimerkiksi veden kovuus). Näiden lisäksi ongelmia on saattanut syntyä myös verkostoon asennetuista, epäasiallisen varastoinnin seurauksena, ruostuneista putkista sekä huolimattomasti suoritetusta asennustyöstä, jolloin verkkoon on päässyt hiekkaa tai erilaisia asennusjätteitä. Tavallisimmin esiintyviä korroosimuotoja vesikierron puolella ovat (Energiateollisuus 2007, s. 1):

- happikorroosio,
- vetyä kehittävä korroosio,
- eroosiokorroosio,
- ammoniakkikorroosio,
- galvaaninen korroosio,
- jännityskorroosio ja
- biologinen korroosio.

Teräksisten virtausputkien tapauksissa erityisesti happikorroosio on ongelma, sillä sitä esiintyy paikoissa, joissa happipitoinen vesi pääsee kosketuksiin teräksen kanssa. Korroosionopeutta kasvattaa lämpötilan nousu sekä veden suurentunut suolapitoisuus. Tyypillisesti happikorroosio on teräväreunaista kuoppakorroosiota, joka tuhoaa materiaalin suhteellisen nopeasti. Kaukolämpöverkon vesikiertoon vettä saattaa päästä esimerkiksi lisä- ja täyttöveden mukana sekä alipaineisten osien ilmapuodoissa. (Energiateollisuus 2007, s. 3)

3.1.4 Paine ja lämpötila

Kiertoveden laatukysymysten lisäksi myös veden paineella ja lämpötilalla on vaikutusta putkien kestävyYTEEN ja sisäpuolisten vuotojen syntyyn. Korkean lämpötilan todettiin jo edellä (kappale 3.3) rasittavan materiaaleja, mutta samoin on myös sisäpuolisen paineen laita. Maailmalla, etenkin Japanissa ja Iso-Britanniassa, on tehty paljon tutkimustyötä paineen ja vuotojen yhteyden ymmärtämiseksi julkisissa vesijohtoverkoissa, joissa esimerkiksi epäsäännöllisen paineenvaihtelun on todettu aiheuttavan 10- tai jopa 20-kertaisen määrän uusia vuotoja verrattuna tilanteeseen, jossa systeemi toimii tasaisessa paineessa. (Thornton 2003) Verkon paineen pysyessä tasaisena alle verkon mitoituspaineen tulisi kaukolämpöjohtojen kuitenkin kestää ongelmitta, eikä verkon painetason alentamista voida pitää kaukolämpösystemissä keinona vuotojen ehkäisemiseksi (Siitonen 2012).

3.1.5 Johtorakenne

Kaukolämpöjohtojen eri rakennetyyppien ja niiden ominaispiirteiden ei ehkä yksinään voida sanoa olevan syynä johtovaurioihin, mutta niiden voidaan kuitenkin tunnistaa olevan altistava tekijä muiden ulkopuolisten ympäristötekijöiden vaikutukselle. Vikaantuvuuden rakennetyyppisidonnaisuus ilmenee eritoten esimerkiksi betonielementtikanavien ja liikenteen aiheuttaman kuormituksen välillä: liikenteen kuormitus ja pitkään jatkuva värinä voi johtaa suojakuorielementtien siirtymiseen pois paikoiltaan, jolloin ulkopuolinen vesi pääsee elementin saumoista tippuvetenä virtausputkien pinnalle johtaen lopulta paikalliseen syöpymään. Kiinnivaahdotetussa rakenteessa samankaltaista vaikutusmekanismia ei puolestaan ole rakenteen saumojen kestäessä myös liikenteen aiheuttamaa värinää aukeamatta. (Siitonen 2012) Putkistojen suunnittelu- ja rakennusvaiheessa edellytetään myös huomioitavan, että ne kestävät ulkopuolelta aiheutuvat kuormitukset ja että todennäköisyys kriittisten rajatilojen ylittymiseen on riittävän pieni putkiston koko eliniän ajan (Koskelainen et al. 2006, s. 242–243). Vikaantuvuuden ollessa esimerkinmukaisesti ainakin osittain yhteydessä johtorakenteeseen, on mielekästä, että esimerkiksi kaukolämpöverkkojen tilastollista vikaantuvuustarkastelua varten selvitetään verkon kokonaisvikaantuvuuden lisäksi myös johtotyypeittaiset vikaantuvuudet tarkempien ja todellisuutta kuvaavampien johtopäätösten tekemiseksi.

3.1.6 Rakentamisen laatu

Yleensäkin ottaen komponenttien vaurioitumisherkkyydelle altistavana tekijänä voidaan pitää niiden keskimääräistä heikompa lähtökuntoa. Komponenttien ikääntyminen vaikuttaa osaltaan heikentävästi materiaali- ja kestävyysominaisuuksiin, mutta ainakin tilastotarkastelujen valossa vaikuttaisi kaukolämpöjohtojen kohdalla pitemminkin rakennusvaiheen laadullisilla tekijöillä olevan selkeämpi yhteys johtojen vauriomääriin kuin niiden iällä. Vauriotilastoja tutkimalla on esimerkiksi usein havaittavissa sidonnaisuutta vauriomäärien ja rakennusajankohdan välillä. Selkeät vikapiikit ovat monesti yhteydessä nopeaan vuotaiseen rakennustahtiin, mikä oletettavasti liittyy rakennuslaadun kärsimiseen kovan kiireen seurauksena. Toisekseen vauriotilastoista on

tunnistettavissa myös rakentamisaikajohdantoisidonnaisia vikapiikkejä, jotka kytkeytyvät uusien johtorakenteiden käyttöön siirtymiseen ja uusien työmenetelmien opetteluaiheeseen. (Andersson et al. 1997, Andersson et al. 1999, s. 30 & Hlebnikov et al. 2010)

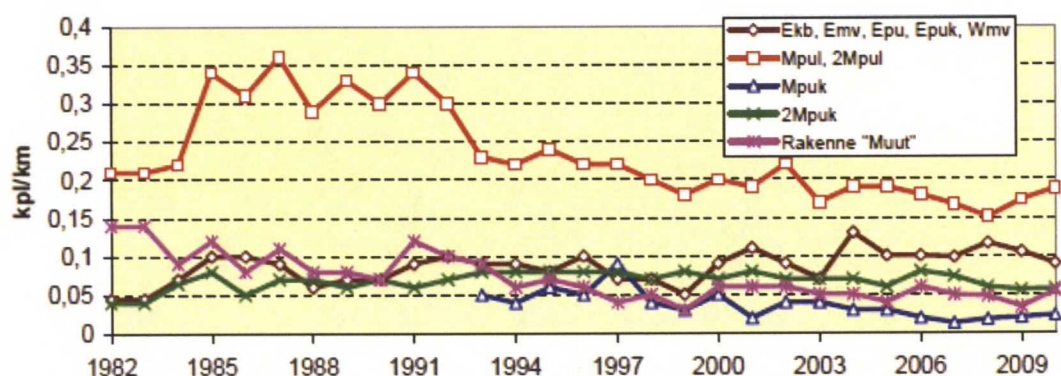
3.2 Kaukolämpöverkkojen vikaantuvuus ja tyypillisimmät johtovauriot Suomessa

Suomessa kaukolämpöverkkojen tyypillisimmistä vaurioista ja vikaantuvuuksista on saatavissa tilastomateriaalia Energiateollisuus ry:n (ET) vuosittain julkaisemasta kaukolämpöverkon vaurioutilastosta. Nämä julkisesti saatavissa olevat tilastojulkaisut tarjoavat kaukolämpöyhtiöille mahdollisuuden peilata oman verkkonsa tilaa valtakunnallisiin tyyppi- ja keskiarvoihin, jotka on saatu ET:n jäsenyrityksilleen tekemien kyselyjen vastauksista. Tässä kappaleessa on tehty katsaus vuoden 2010 vaurioutilastoon, johon vastanneiden lämpölaitosten kokonaisjohtopituus vastasi hieman alle 70 % koko jäsenistön johtopituudesta. (Energiateollisuus 2011d, s. 1)

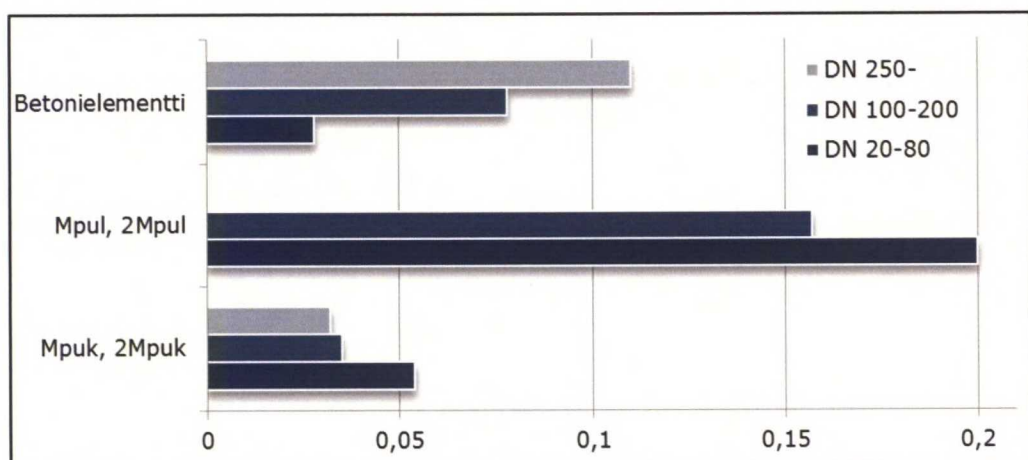
ET:n vaurioutilastossa kaukolämpöjohtojen vikaantuvuustietoja on ilmoitettu johtorakenteen, iän ja koon suhteen. Kuvassa 10 on esitetty johtojen vikaantuvuuden kehitys johtorakenteittain vuodesta 1982 lähtien. Yleisesti ottaen kaukolämpöjohtojen vikaantuvuuksien (vaurioiden määrä/johtokilometri) kehityksessä ei viime aikoina ole ollut havaittavissa selkeää kehityssuuntaa parempaan tai huonompaan. Vikaantuvuuden keskiarvo vuonna 2010 koko johtokanta huomioiden oli 0,08 kpl/km. (Energiateollisuus 2011d, s. 2)

Suomessa vaurioalteimmaksi johtotyyppiksi voidaan nimetä fiskars-rakenne, jonka vikaantuvuus 1980-luvulla on ollut jopa luokkaa 0,3-0,35 kpl/km. Viime vuosikymmenellä fiskarsin vikaantuvuus vaikuttaisi alentuneen tasolle, joka on silti edelleen esimerkiksi 2-3-kertainen (0,15–0,2 kpl/km) maamme tyypillisimpään johtorakenteeseen, 2Mpuk:iin, verrattuna. Fiskars-rakenteen vauriot koskettavat pienen ja keskisuuren kokoluokan DN 20–200 johtoja (kuva 11). Viime vuosina toiseksi vikaantunein rakenne ovat olleet betonielementtikanaavat, joissa vaurioita on etenkin suurimman kokoluokan, yli DN 250, johdoissa. Käyttövarmimpia johtoja ovat olleet

kiinnivaahdotetut kaksiputkijohdot (Mpuk), joissa vaurioita on keskimäärin ilmennyt vain noin 0,02 kpl/km.



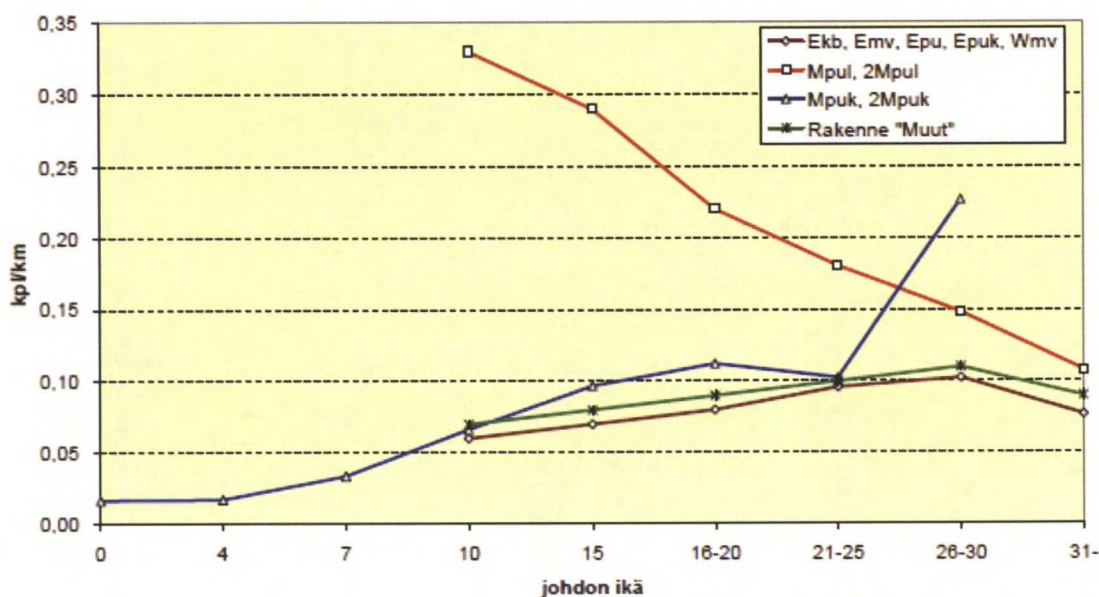
Kuva 10 Kaukolämpöjohtojen vikaantuvuuden kehitys vuodesta 1982 lähtien. Lähde: Energiateollisuus 2011d, s. 16



Kuva 11 Kaukolämpöjohtojen vauriitiheys Suomessa 2010 niiden koon mukaan. Lähde: Energiateollisuus 2011d, s. 6

Johtojen vauriitiheyksien tutkiminen niiden käyttöiän suhteen (kuva 12) paljastaa melko yllättävän tuloksen fiskars-rakenteen osalta. Päinvastoin kuin muilla rakenteilla sen vikaantuvuus näyttäisi laskevan jyrkästi johtojen iän kasvaessa. Ilmiötä selittänee se, että rakennetta on perusparantamalla korvattu muilla rakenteilla, jolloin huonoimmat ja eniten oireilleet kohdat on saatu poistettua. Fiskarsin huomattavan suuri vikaantuvuus uudehkoissakin johdoissa viittaa siihen, että rakenne on luultavasti erityisen herkkä esimerkiksi asennusvirheille ja näistä aiheutuville vaurioille. Kiinnivaahdotettujen johtojen silmiinpistävä vikaantuvuuspiikki yli 20 vuotta vanhoissa

kaukolämpöjohdoissa johtunee puolestaan uuden rakenteen rakentamiseen liittyvistä alkuvaikeuksista työmenetelmien ja materiaalien suhteen. (Pirvola 1996, s. 22–23)



Kuva 12 Kaukolämpöjohtojen vauriotiheys niiden käyttöiän suhteen. Lähde: Energiateollisuus 2011d, s. 18

Selkeästi tyypillisimmäksi kaukolämpövuodon aiheuttajaksi kaikki johtorakennetyypit huomioiden voidaan samaisen tilastojulkaisun perusteella nimetä epätiivit suojakuoriliitokset. Muuten vauriosyiden osuuksilla eri johtorakenteiden välillä on kuitenkin melko lailla hajontaa, mikä selittyy osaltaan eri rakenteiden ominaispiirteillä. Kiinnivaahdotetuissa kaksiputkijohdoissa vuosittain noin puolet vaurioista on tavalla tai toisella yhteydessä epätiivisiin tai vaurioituneisiin liitoksiin, jotka pääasiassa koskevat kutisteliitoksia. 2Mpuk-johdoissa ulkopuolisen aiheuttajan synnyttämien vaurioiden osuudeksi kirjattiin vuonna 2010 22 % ja teräsputkien hitsausvirheiksi 13 %. Mpuk-johdoissa sen sijaan hitsausvirheiden osuus vuonna 2010 oli dominoiva, sillä ne käsittivät vaurioista yli 40 %. Ilmiötä selittää Mpuk-rakenteen hitsauksen edellyttämä suurempi tarkkuus. Fiskars-rakenteella merkittävä vaurioiden aiheuttajia ovat tilastojen perusteella niin ikään epätiivit suojakuoriliitokset, mutta myös maanpainumat sekä johtojen virheellinen kaltevuus. Betonielementtikanavilla vauriot liittyvät vastaavasti suurimmissa määrin betonikanavarakenteiden epätiivisiin betonielementtisaumoihin sekä epätiivisiin betonivaluihin. (Energiateollisuus 2011d, s. 3-4)

3.3 Odotettavissa olevien vaurioiden mallintaminen

Ensimmäisessä luvussa todettiin kaukolämpöjohtojen perusparantamisen olevan kiinteästi sidoksissa niiden huonokuntoisuuteen, josta kielivät toistuvat korjaukset samassa johtolinjassa. Pelkästä huonokuntoisuuden tiedostamisesta ei kuitenkaan ole oleellisesti hyötyä päätettäessä, milloin tietty johto-osuus perusparannetaan yleispätevän ja ennalta määritellyn vikakynnyksen puuttumisen vuoksi. Perusparantamisen ollessa sekä kallista että vieden resursseja verkon muulta rakennustoiminnalta on ymmärrettävää, että johtojen kokonaan uusimista halutaan lykätä niin pitkälle kuin mahdollista. Toisaalta kuitenkin vikaantuvuuden pysyessä korkealla tai jopa kasvaessa nousee esille kysymys siitä, kuinka pitkälle perusparantamista on optimaalista lykätä ajatellen ajan kuluessa kumuloituvia korjauskustannuksia. Perusparannussuunnittelun lähestyminen kumuloituvien korjauskustannusten kautta on kuitenkin ongelmallista, sillä laskelmia varten tarvittaisiin luotettava arvio vauriomääristä tulevaisuudessa.

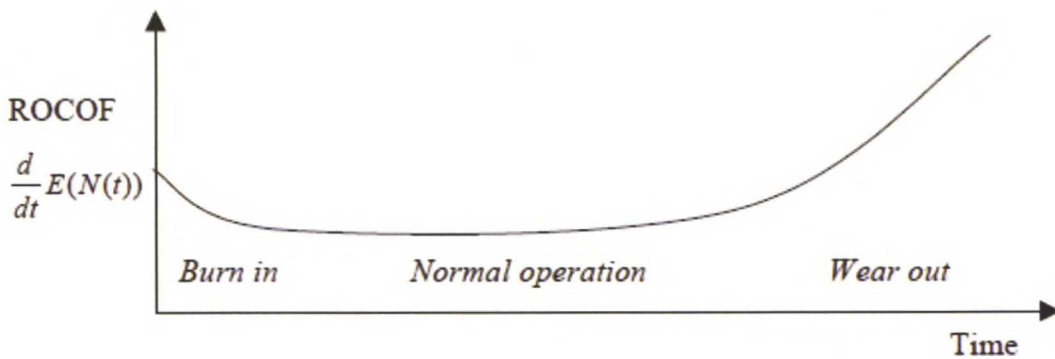
Vesijohtojärjestelmissä odotettavissa olevien vauriomäärien mallintamista ja ennustamista on tutkittu paljon jo 1970-luvulta lähtien juuri optimaalisten perusparannusajankohtien löytämiseksi (Le Gat et al. 2000). Maanalaisten vesijohto- sekä kaukolämpöverkkojen välillä voidaan tunnistaa olevan paljon samankaltaisia ominaisuuksia sekä johtojen toimintakuntoon vaikuttavia tekijöitä. Vesijohtojärjestelmien johdot ovat esimerkiksi käyttöikänsä niin ikään pitkiä ja järjestelmistä löytyy samalla tavoin eri aikoina rakennettuja, rakennetyypeiltään erilaisia sekä dimensioltaan erikokoisia johtoja. Myös vesijohtojen vikaantuvuuksien kannalta riskitekijät, kuten liikenteen aiheuttama kuormitus ja maaperäolosuhteet, ovat pitkälti samoja kuin kaukolämpöjohdoilla. Edellä kuvatus, selkeästi havaittavissa olevan, analogian vuoksi tässä kappaleessa pohditaankin tulevaisuuden vauriotiheyksien ennustamismahdollisuuksia vesijohtopuolella tehdyn tutkimustyön ja kehiteltyjen mallien kautta.

Vauriotiheyden (vikataajuuden) matemaattista mallintamista varten määritellään aluksi termin sisältö tässä yhteydessä sen yleistä merkitystä täsmällisemmin. Seuraavassa vauriotiheydestä puhuttaessa viitataan vauriomäärien ajalliseen esiintymistiheyteen ja

englanninkieliseen termiin 'rate of occurrence of failures' (ROCOF). Matemaattisesti ilmaistuna ROCOF tarkoittaa odotettavissa olevien vaurioiden kumulatiivisen määrän aikaderivaattaa eli kaavamuodossa ilmaistuna

$$ROCOF \equiv \frac{d}{dt} E(N(t)) \quad (3.1)$$

jossa $E(N(t))$ on keskimääräinen vauriomäärä aikavälillä $(0,t]$. Edellisissä kappaleissa todettiin jo tilastotiedoista piirrettyjen käyrien avulla, ettei johtojen vauriotiheys pysy koko ajan samana, vaan siinä on havaittavissa muutoksia. Teoreettisesti systeemien vauriotiheyksien on esitetty kehittyvän kuvan 13 mukaisen ”kylpyammekäyrän” (bathtub curve) mukaisesti. (Røstum 2000, s. 2-7)

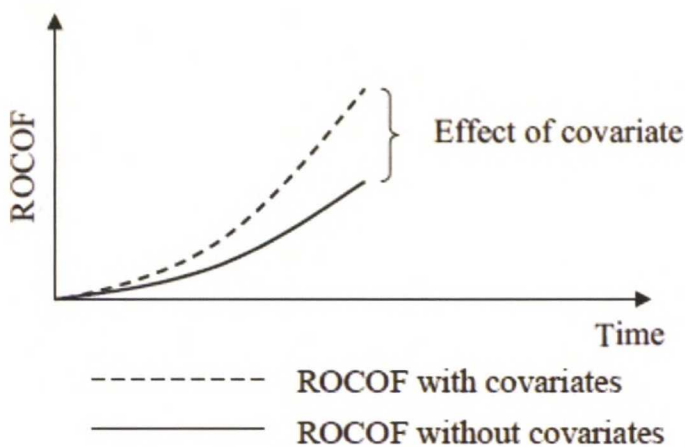


Kuva 13 Systeemin vauriotiheyden muuttuminen ajan/ikäntymisen funktiona. Lähde: Røstum 2000, s. 6

Käyrän perusteella ROCOF on aluksi korkea lähtien kuitenkin melko nopeasti laskuun (burn in -vaihe). Käytännössä alun korkea vauriotiheyden taso juontuu materiaalien ja asennuksen laatuongelmista rakentamisen alkutaipaleella. ROCOF:n laskun jälkeen vauriotaajuus pysyy melko alhaisella tasolla ja suhteellisen vakiona (normal operation), mutta lähtee jälleen jossain kohden nousuun ikääntymisen seurauksena (heikkenemisvaihe, wear out). Periaatteessa tilastotietoja tutkimalla voidaan yrittää päätellä, missä käyrän mukaisessa kehitysvaiheessa tutkittavana oleva systeemi on. (Røstum 2000, s. 2-7)

Todellisuudessa käyrän kaikkia vaiheita ei välttämättä ole havaittavissa. Tähän on ensinnäkin syynä se, ettei vauriotilastomateriaalia useimmiten ole saatavilla alkuaajoista

lähtien. Toisekseen systeemin kehitykseen vaikutetaan vaurioiden korjauksen ja perusparantamisen myötä. Systeemin tila voi siirtyä eri tasolle riippuen korjaavien toimenpiteiden laadukkuudesta: systeemin tila voi vaihtoehtoisesti pysyä joko samana (bad as old), kohentua uutta vastaavaksi (good as new), huonontua (worse than old) tai olla myös jotain näiden väliltä. Käyrän muoto voi myös muuttua muiden vaurioille altistavien tekijöiden vaikutuksesta (esim. liikenteen kuormitus, maaperäolosuhteet) ikääntymisen selittäessä loppujen lopuksi vain osan vauriotodennäköisyyksistä (kuva 14). Tarkempien vauriokehitystä kuvaavien mallien edellytyksenä onkin, että niillä voidaan ottaa huomioon useampia parametreja. (Røstum 2000, s. 7-8)



Kuva 14 Vauriotiheyden kehitys pystytään selittämään vain osittain systeemin ikääntymisellä, jolloin vauriokehityksen luotettava mallinnus edellyttää myös muiden riskitekijöiden huomioimista. Lähde: Røstum 2000, s. 8

Perusparannussuunnittelua tehtäessä tulisi lisäksi pohtia, kuinka luotettavasti tilastomateriaalista johdetut vaurioennusteet pystyvät kuvaamaan nimenomaisesti tarkastelussa olevien johto-osuuksien vikakehitystä. Ennusteiden laadinnassa käytettävä tilasto-otanta voidaan tehdä joko verkko-, johtoryhmä- tai johtotasolla, eikä liian yleisellä tasolla laadittu mallinnus välttämättä sovellu käytettäväksi kuvaamaan yksittäisiä johto-osuuksia. Etenkin verkkotason ennustetulosten käyttökelpoisuus on kyseenalaista otannan ollessa hyvin epähomogeeninen, mutta toisaalta vielä kuvaavan johtoryhmätasoon muodostaminen ei ole helppoa vikaantuvuuksiin vaikuttavien tekijöiden runsauden ja johtojen toisistaan eroavien korjaushistorioiden takia. Johtotason ennustaminen ei puolestaan useinkaan ole mahdollista vauriomäärien

jäädessä suhteellisen vähäisiksi johtaen johtopäätösten tilastolliseen pätemättömyyden. (Park et al. 2007)

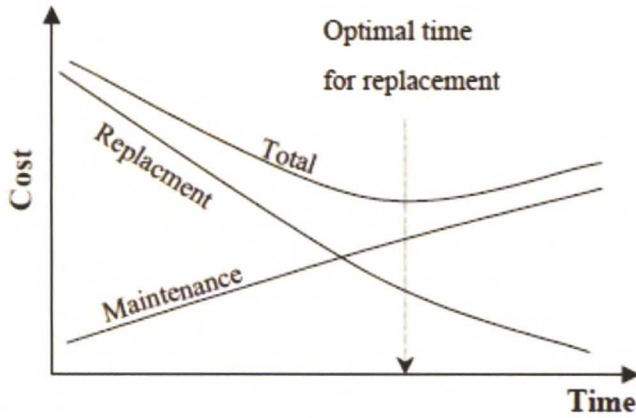
Vauriotiheyden kehityksen ennustamiseen liittyvistä epävarmuusrajoitteista huolimatta etenkin kylpyammekäyrän heikkenemisvaiheen vikakehityksen mallintaminen on ollut suuren kiinnostuksen kohteena etsittäessä optimaalista ajankohtaa johtojen uusimiselle korjaamisen sijaan (Park et al. 2007). Systeemin kunnon heikkenemisvaiheen oletuksena on, että korjaaminen suoritetaan käyttäen vähimmäiskorjausstrategiaa (minimal repair), jolloin systeemi palaa vanhaa vastaavaan kuntoon (as bad as old) ja jatkaa toimintaansa samoin kuin juuri ennen korjausta. Tällöin heikkenemistä voidaan mallintaa epähomogeenisen Poisson-prosessin avulla, joka sallii vikataajuuden muuttumisen ajan funktiona. (Watson et al. 2004) Homogeenisen Poisson-prosessin absoluuttinen vikataajuus (ROCOF) pysyy puolestaan vakiona ajasta riippumatta. (Bergman 1998, s. 22).

Yksi ensimmäisiä ja tunnetuimpia vauriotilastojen analyysiin perustuvista vikataajuuden kehittymistä kuvaavista malleista on esimerkiksi Shamirin ja Howardin (1979) kehittämä, jossa vikataajuutta mallinnetaan pelkästään ajan funktiona. Shamir ja Howard esittivät vikataajuuden kehittymisestä kaksi eri yhtälöä, joista toisessa kasvun on oletettu olevan eksponentiaalista (kaava 3.2) ja toisessa lineaarista (kaava 3.3):

$$B(t) = B(t_0)e^{G(t-t_0)} \quad (3.2)$$

$$B(t) = B(t_0)G(t - t_0) \quad (3.3)$$

joissa t on aika vuosissa (tällöin vältetään vuodenaikavaihteluista aiheutuvat poikkeamat vauriomääriin), t_0 on perusvuosi (asennusvuosi tai ensimmäinen tilastovuosi), $B(t)$ on vuoden aikana sattuneiden vaurioiden lukumäärä johtoyksikköä kohti ja A on kasvunopeusvakio, joka määritetään tilastoaineistosta. Johtojen uusimisen taloudellisen optimiajankohdan löytämiseksi vauriotodennäköisyyden ja ikääntymisen yhteyttä käytettiin hyväksi minimoidessa korjausten ja johtojen uusimisen aiheuttamia diskontattuja kokonaiskustannuksia (kuva 15).



Kuva 15 Käsitteellinen idea optimaalisen perusparannusajankohdan löytämisestä tarkasteltaessa johtojen uusimisajankohdasta nykyhetkeen diskontattuja uusimis- ja korjauskustannuksia Shamirin ja Howardin teoreeman mukaisesti. Lähde: Røstum 2000, s. 28 / Shamir ja Howard 1979

Shamirin ja Howardin mallin etuna on etenkin sen helppokäyttöisyys sekä sovellettavuus niin verkko- kuin johtotasollakin. Mutta koska malli huomioi pelkästään vauriotaajuuden aikasidonnaisuuden, kärsii tulosten luotettavuus. Luotettavampia tuloksia varten selittäviä tekijöitä tarvittaisiin lisää ja esimerkkejä muista ennustekehityksistä löytyy esimerkiksi lähteestä Røstum 2000. Kaikkia malleja yleisesti yhdistävänä tekijänä on kuitenkin ajatus siitä, että vauriokehitystä on mahdollista ennustaa tilastomateriaalin pohjalta.

3.4 Vuotokohtien paikallistaminen

Kaukolämpöjohtojen sijainti maanpinnan alapuolella asettaa huomattavan haasteen vuotojen havaitsemiseksi sekä vuotokohtien löytämiseksi. Erilaisia menetelmiä maanalaistenkin vuotojen paikantamiseksi löytyy kuitenkin useita ja nykyisin käytössä olevien menetelmien kirjoon lukeutuu niin perinteisempiä verkon tuntemukseen, päättelyyn ja kokeiluun perustuvia tapoja kuin uudemman polven teknisempiä menetelmiä. Kaukolämpöjohtojen eri rakennetyypit ominaispiirteineen, kustannuskysymykset sekä paikannustarkkuus asettavat rajoituksensa eri menetelmien hyödyntämismahdollisuuksille. (Suomen kaukolämpö ry 1998, s. 1)

Perinteisimpiä vuodonpaikannusmenetelmiä edustavat näköhavaintojen teko, koekaivaukset sekä lämpökameroiden käyttö. Näköhavaintojen teko perustuu

silmämääräisesti havaittavien vuotomerkkien, kuten höyryävien betonielementtikanavien tuuletusputkien, talvisaikaan sulien maalänttien sekä värjätyä kaukolämpöveden pintaantulon, havaitsemiseen. Koekaivauksia tehtäessä vuotokohtaa yritetään paikantaa kaivamalla johto-osuus tarvittavan monta kertaa auki vuotokohdan löytymiseksi. Kaivuukohtien valinta perustuu johtopiirustuksiin sekä suunnittelu- ja käyttöhenkilöstön kokemukseen, joiden avulla yritetään arvioida johto-osuuden heikoimpia kohtia ja todennäköisimpiä vuotokohtia. Koekaivausten ongelmana on, että menetelmä tulee helposti kalliiksi ja ympäristöä kuormittavaksi, jos kaivuukohtien valitsemisessa ei ole tuuria. Lämpökameroilla pystytään mittaamaan pintalämpötiloja sekä niiden eroja noin 0,1 °C:een tarkkuudella, jolloin niiden avulla kyetään paikantamaan lämpimän vuotoveden aiheuttama paikallinen ympäristön lämpötilan nousu. Kuvauksia on mahdollista suorittaa niin maasta kuin ilmasta, mutta etenkin ilmakehän tekemistä rajoittaa menetelmän herkkyys ulkopuolisille olosuhteille. Kuvaukset eivät esimerkiksi onnistu lumien aikaan, sateella, liian lämpimillä keleillä tai auringonpaisteessa, jolloin parhaita ajankohtia ovat kevät ja syys-lehdettömään aikaan. Ilmasta otettujen lämpökamerakuvien tulkinta ja todellisten putkivuotojen erottaminen voi lisäksi olla hankalaa ja edellyttääkin kokemusta sekä verkon tuntemista. (Partanen 1983, s. 5-7 & Pennanen 1984, s. 3-11)

Muita teknisempiä apuvälineitä edellyttäviä vuodonpaikannusmenetelmiä edustavat esimerkiksi videokuvaus ja korrelaatiotekniikka sekä kiinteästi johtoihin asennettava vuodonilmaisintekniikka. Kaukolämpöputkien ulkopuolinen videokuvaus on mahdollista vain betonielementtikanavien tapauksessa, joissa vetävillä pyörillä ja pitkällä kaapelilla varustettu videokamera pääsee kulkemaan. Korrelaatiotekniikka edustaa puolestaan kuuntelutekniikkaa, joka perustuu analysointilaitteiden avulla mitattavien vuodosta syntyvien äänien etenemiseen. Kiinteitä vuodonilmaisintekniikoita edustavat kosteudenvalvonta vastusmittauksilla, mikä edellyttää kaukolämpöjohtojen varustamista hälytysjohtimilla, sekä lämpötilatasojen mittaukset optisilla kuiduilla. Teknisempien keinojen käyttöä olisi vielä mahdollista lisätä, mutta koska perinteisilläkin menetelmillä usein pärjätään, on niiden suosiota vähentänyt laitteiden hintavuus (Suomen kaukolämpö ry 1998, s. 1 ja 5).

Putkivuotojen etsimisen ja paikantamisen lisäksi löytyy myös menetelmiä muhviiliitosten täyttöasteen ja tiiveyden tarkastamiseksi. Muhviiliitosten eristeen täyttöaste voidaan todeta esimerkiksi joko röntgen- tai lämpökamerakuvausten avulla. Röntgenmenetelmässä liitos kuvataan vaakasuunnassa pienellä energialla, jolloin röntgenkuvasta on selkeästi nähtävissä onko vaahdotettu eriste täyttänyt tilan kokonaan. Lämpökameralla vajaa täyttöaste pystytään toteamaan pintalämpötilojen erona, mikä edellyttää, että putki on otettu käyttöön ja liitos on näkyvissä. Liitosten tiiveys kyetään puolestaan tarkastamaan vuotokoestuksella tai tunkeumanestetarkastuksella. Vuotokoestus voidaan toteuttaa useammalla tekniikalla. Näistä ensimmäisessä vaahdotettava tila sisältäen joko ilmaa tai erillistä merkkikaasua paineistetaan pieneen ylipaineeseen ennen vaahdotusta, minkä jälkeen liitos tarkastetaan ulkopuolelta vuototesterillä ja vuoto ilmenee kuplimisena. Merkkikaasu on havaittavissa myös erillisellä haistajalla. Toinen keino on suorittaa imulaatikkotestaus, jossa muhvin päälle ruiskutetaan vuototesteriä, minkä jälkeen imulaatikolla laatikkoon imetään alipaine, jolloin vuotokohdat niin ikään kuplivat. Tunkeumanestetarkastus on helppo ja halpa menetelmä, jossa liitoskohdan puhdistuksen jälkeen sen pinnalle ruiskutetaan tunkeumanestettä, jonka annetaan vaikuttaa 15–60 minuuttia lämpötilasta riippuen. Vaikutusajan jälkeen liitos pestään vedellä tai liuottimella, jotta ylimääräinen tunkeumaneste saadaan poistettua kappaleen pinnalta jääden kuitenkin vikoihin. Pinta kuivataan ja ruiskutetaan kehitteellä, joka imee tunkeumanesteen mahdollisista raoista, jolloin esimerkiksi pitkähköt raot näkyvät kehitteessä punaisina viivoina. (Pasonen et al. 2006, s. 22–23)

3.5 Rakentamisen laadunvarmistus

Kaukolämpöverkon laatu ja kestävyys ovat kaukolämpötoiminnan kannalta ensiarvoisen tärkeitä tekijöitä. Tähän on ensinnäkin syynä se, että kaukolämpöjohdot sijaitsevat pääosin maan alla piilossa, mikä tekee niiden kunnon arvioimisesta ja hoitamisesta vaikeaa. Tästä huolimatta niiden oletetaan pystyvän palvelemaan käytössä kovimmissakin käyttölämpötiloissa vähintään 30 vuotta (Energiateollisuus ry 2003, s. 5) ja näin pitkä palvelusaika saavutetaan vain, jos rakennustyö on tehty laadukkaasti (Randlov 1997, s. 215). Taloudellisesta näkökulmasta ajateltuna kaukolämpöverkkoon on sitoutunut investointikustannuksina suuria pääomia, jolloin

kokonaiskustannuksiltaan lämmön siirto muuttuu sitä edullisemmaksi mitä vähemmän verkkoa tarvitsee käytön aikana korjata. Näin ollen huolimatta siitä, että verkon suunnittelu- ja rakennusvaiheessa pyritäänkin taloudelliseen optimiin, tulisi samalla kuitenkin myös huomioida, ettei verkon luotettavuus ja käyttövarmuus samalla kärsi.

Suomessa on viimeaikaisten kansainvälisten vertailujen (Sirola 2004, s. 6) perusteella onnistuttu erittäin hyvin rakennuskustannusten optimoinnissa laadun kuitenkin kärsimättä. Tilastojen valossa kaukolämpöjohdot rakennetaan Suomessa vertailumaihin nähden alhaisimmin kustannuksin, mutta samanaikaisesti kunnossapitokustannukset ja vaurioitiheys ovat varsin alhaisella tasolla. (Sirola 2004, s. 6) Tänä päivänä kaukolämpörakentamisen laadunedistämisen voidaan sanoa Suomessa olevan varsin hyvällä mallilla ja suhtautuminen sen merkitykseen on vuosikymmenien saatossa parantunut huomattavasti. Aikoinaan heikko laadunvalvonnan taso on esimerkiksi mahdollistanut, että nyt jälkikäteen on löydetty kiinnivaahdotettuja johto-osuuksia, joissa vaahdotusreiät ovat jääneet saumaamatta (Pulakka 1987, s. 3).

Nykyisin laadunedistäminen perustuu Suomessa niin materiaalien kuin rakentamisenkin pitkälle vietyyn standardointiin sekä laadunvarmistusjärjestelmiin. Kaukolämpöverkkojen rakentamista varten on markkinoilla nykyisin esimerkiksi saatavilla standardoituja ja koestettuja kaukolämpöjärjestelmiä, jotka sisältävät kaikki rakentamiseen tarvittavat komponentit (Logstor 2008, s. 2). Tällaisten tasalaatuisten ja testattujen osien käyttö omalta osaltaan ehkäisee vuotojen syntymistä. Energiateollisuus ry ja Muoviteollisuus ry:n (MT) pyrkivät ylläpitämään sekä edistämään laatua niiden organisoiman laadunvarmistusjärjestelmän avulla. Laadunvarmistusjärjestelmä pitää sisällään niin kaukolämpöverkon rakentamisessa käytettävien tuotteiden ja materiaalien (putket ja putkiosat, liitosratkaisut ja venttiilit) sertifiointimenettelyn kuin kaukolämpöjohtojen liitos- ja muovihitsaustyötä suorittavien urakoitsijoiden ja asentajien auktorisointimenettelyn. Alun perin valmistajat osoittivat tuotteidensa vaatimustenmukaisuuden kansallisella LT-laatumerkillä (kuva 16), mutta tuotesertifiointin osalta ollaan vuodesta 2011 alkaen asteittain alettu siirtyä käyttämään eurooppalaisen sertifiointimenettelyä (EHP-sertifikaatti). Urakoitsijoiden ja asentajien auktorisointi on sen sijaan edelleen säilynyt kansallisena toimintana. Urakoitsijat

pystyvät osoittamaan pätevyytensä asennusoikeus- ja asentajat liitostyötodistuksella. (Energiateollisuus 2012, Sirola 2010b)



Kuva 16 LT-laatu-takuumerkki (vasemmalla) sekä EHP-sertifikaatin tunnus. Lähde: Energiateollisuus 2012

Ainakaan vielä nykytilanteessa sertifioitujen tuotteiden ja auktorisoitujen urakoitsijoiden ja asentajien käyttö eivät ole viranomaisvaatimuksia vaan vapaaehtoista laadunvarmistusjärjestelmään osallistumista. Laadunvarmistuksen kannalta tämä on kuitenkin erittäin suositeltavaa, sillä lopulta laatu voidaan varmistaa vain sitä vaatimalla ja valvomalla. Suomessa kaukolämpöyritykset hankinnoissaan edellyttävät varsin kattavasti sekä tuotteiden sertifikaattia että liitostöiden auktorisointia. (Energiateollisuus 2012, Sirola 2010b, Randlov 1997, s. 215)

4 Kaukolämpöverkon perusparantaminen

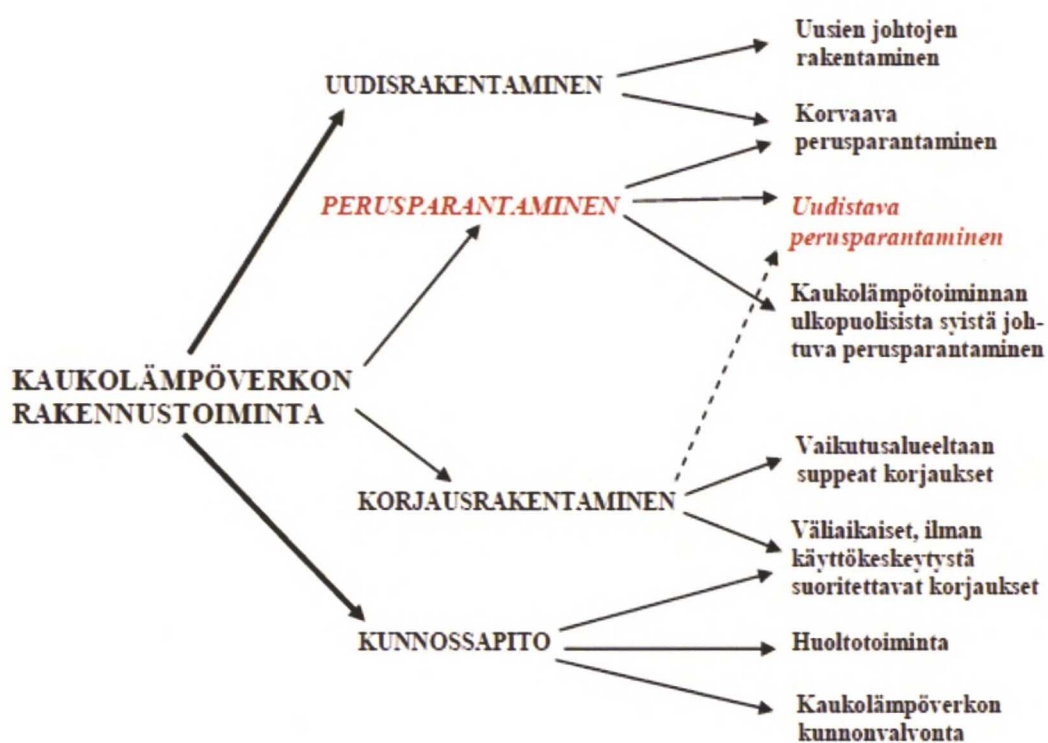
Kaukolämpöverkkojen rakentaminen aloitettiin Suomessa 1950-luvulla (Koskelainen et al. 2006, s. 34), minkä jälkeen kaukolämpöalalla on eletty jatkuvan kasvun aikaa. Viime aikoina, kaukolämpöverkkojen keskimääräisen käyttöiän noustessa, on kuitenkin ollut havaittavissa merkkejä siirtymisestä jatkuvan kasvun vaiheesta yhä enemmän verkon ylläpitokulttuurin suuntaan. Perusparannustoiminnan suhteellinen osuus kaukolämpöverkon rakennus- ja investointitoiminnasta on ollut koko ajan hiljalleen nousussa, vaikkakin vuotuiset perusparannusmäärät ovat silti vielä jääneet melko vähäisiksi. Perusparannuskohteiden valikoituminen on ollut kiinteästi sidoksissa havaittuihin johtovaurioihin ja niiden korjaamisen yhteydessä tehtyihin johto-osuuksien uusimistöihin. (Energiateollisuus 2008b, s. 1 & Pirvola 1996, s. 13)

Suunnitelmalliseen perusparantamiseen liittyvien tavoitteiden voidaan ajatella liittyvän sekä lämmöntoimitusvarmuuden parantamiseen että taloudellisiin motiiveihin. Näistä lämmöntoimituksen luotettavuus on luokiteltavissa tärkeäksi kaukolämmön imagoon ja kilpailukykyyn lämmitysmarkkinoilla vaikuttavaksi tekijäksi. Vanhojen ja huonokuntoisten kaukolämpöjohtojen korvaamiseen uusilla liittyy lisäksi monia ja usein jopa huomattavia kustannussäästöjä, jotka niin ikään ovat tärkeässä roolissa perusparannuskohteista päätettäessä.

4.1 Perusparantamisen määrittely

Kaukolämpöverkon perusparantaminen on käsite, johon liittyy paljon tulkinnanvaraisuutta. Yleisesti ottaen kaukolämpöverkon perusparantamisella viitataan kuitenkin vanhojen ja huonokuntoisten johto-osuuksien korvaamiseen uusilla kaukolämpöjohdoilla paremman käyttövarmuuden ja pidemmän aikavälin kustannussäästöjen saavuttamiseksi. Huonokuntoisen johtokannan uudistamisen lisäksi intresseissä voi toisaalta olla myös verkon teknisten ja toiminnallisten ominaisuuksien kehittäminen sekä esimerkiksi verkon rakenteellinen yhtenäistäminen. (Energiateollisuus 2008b, Pirvola 1996, s. 13 & 63, Siitonen 2012)

Käytännössä työkohteiden luokittelussa perusparannuskohteiksi voi ilmetä epäselvyyttä johtuen siitä, että perusparannustoiminnan lisäksi verkkoon liittyy myös monenlaista muuta rakennustoimintaa. Osa toiminnoista voidaan katsoa osittain jopa päällekkäisiksi, jolloin selkeä rajanveto eri toimintojen välille on hyvin hankalaa, ellei jopa mahdotonta. Periaatteellisesti kaukolämpöverkon rakennustoiminta voidaan jakaa neljään eri osa-alueeseen: uudisrakentamiseen, perusparantamiseen, korjausrakentamiseen ja kunnossapitoon. Perusparannustoiminta itsessäänkin voidaan vielä jakaa kolmeen alaryhmään: uudistavaan perusparantamiseen, korvaavaan perusparantamiseen sekä kaukolämpötoiminnasta riippumattomaan perusparantamiseen. Kuvassa 17 on havainnollistettu, kuinka edellä mainitut toiminnot suhteutuvat toisiinsa nähden. Tässä työssä tarkastelun painopisteenä on uudistava perusparantaminen, joka kuvassa 17 on värjätty punaisella värillä. (Energiateollisuus ry 2008, s. 2 & Pirvola 1996, s. 11)



Kuva 17 Kaukolämpöverkon rakennustoiminnan terminologia. Lähde: Energiateollisuus ry 2008, s.2

Edellä mainittu rajanveto-ongelma korostuu erityisesti tehtäessä eroa korjausrakentamisen ja perusparantamisen välille. Syy tähän on ennen kaikkea se, että perusparantamisen yleisimpänä alkusyyinä on johtovaurio ja suuri osa yritysten

perusparannusohjelmien työkohteista onkin alun perin luokiteltu korjauskohteiksi. Vasta vauriokohtaan liittyvien johto-osuuksien aiempaa luultua huonomman toimintakunnon paljastuttua ne ovat muuttuneet perusparannuskohteiksi, mitä kuvassa 17 on havainnollistettu katkoviivalla. Tällöin perusparantamisen määrittäväksi tekijäksi voidaan ajatella työkohteen laajuus, vaikkakaan metrimittaista raja-arvoa ei luokittelua varten ole olemassa. Toisaalta yhtenä selkeimpänä tunnusmerkkinä ja erona korjausrakentamiseen pidetään kuitenkin yleisesti perusparantamisen suunnitelmallisuutta. Suunnitelmallinen perusparantamistoiminta muodostaakin uudisrakennustöiden rinnalla osan kaukolämpöyhtiöiden vuotuisesta rakennusohjelmasta. (Energiateollisuus ry 2008, s. 2 & Pirvola 1996, s. 11)

Uudistavalla perusparantamisella viitataan perinteiseen perusparantamiseen, jossa huonokuntoinen kaukolämpöverkon osa tai yksittäinen johto-osuus korvataan uudella, vanhan osuuden välittömään läheisyyteen sijoitettavalla rakenteella, ilman että alkuperäinen käyttötarkoitus juurikaan muuttuu. Kuitenkin myös uudistavan perusparantamisen tapauksessa on työkohteiden suunnittelussa huomioitava rakentamisympäristön nykytila kuten uusi kaukolämpöasiakaspotentiaali, aikaisempaa edullisemmat johtoreitit, johtojen mitoitusmuutostarpeet sekä uudet teknologiat. Korvaava perusparantaminen liittyy taas rakennuskohteisiin, joissa uuden johdon rakentamisella korvataan käytöstä poistettavan johto-osuuden käyttötarkoitus ja lisäksi samalla mahdollisesti toteutetaan muuttuneen käyttöympäristön aiheuttamia muutosvaatimuksia. Korvaavan johdon ei tarvitse kulkea lähelläkään vanhaa johtoa, eikä vanhaa johtoa tarvitse edes välttämättä purkaa, mutta lämmönjakelu voidaan hoitaa myös ilman vanhaa johtoa. Tällaisen rakennustoiminnan voidaan siten katsoa sijoittuvan uudisrakentamisen sekä perusparantamisen välimaastoon ja kaukolämpöyhtiöiden tilastoinnissa ne usein luokitellaankin puhtaiksi uudisrakentamiskohteiksi. Korvattavan johdon perusparannustarpeella saattaa kuitenkin olla ratkaiseva merkitys rakennushankkeen käynnistämiseksi ja toteutusajankohtaan. Joskus perusparantaminen voi olla myös riippumatonta itse kaukolämpötoiminnasta ja kaukolämpöverkon toimintakunnosta, jolloin puhutaan ulkopuolisista syistä johtuvasta perusparantamisesta. Ulkopuolisia syitä voivat olla esimerkiksi kaavamuutokset, tietyt sekä ulkopuoliset rakennushankkeet, jotka vaativat maanalaisten yhdyskuntarakenteiden muuttamista. (Koskelainen et al. 2006, s. 356 & Pirvola 1996, s. 12)

4.2 Lämmön toimitusvarmuus

Kaukolämmön kilpailukyky lämmitysmarkkinoilla on ollut perinteisesti vahva. Kaukolämmöntuotannon näköpiirissä on kuitenkin monia kustannuksia nostavia tekijöitä, kuten päästöoikeuksien hintojen kohoaminen yhdistettynä kaukolämmön saamien ilmaisten päästöoikeuksien asteittaiseen vähenemiseen, lämmöntuotannon verojen nousu sekä polttoaineiden kohoavat hinnat. Kustannuspaineet voivat tulevaisuudessa heikentää kaukolämmön kilpailukykyä esimerkiksi sen haastajaksi nousseeseen maalämpöön nähden. Toisaalta kilpailukykytekijöiden lisäksi myös muiden arvojen, kuten lämmönsaannin luotettavuuden ja päästövaikutuksien merkitys, sekä lämmitysmuotojen imagokysymykset ovat alkaneet korostua yhä enemmän. Kaukolämmön kannalta tämä onkin positiivinen asia, sillä kaukolämpö yleensä ottaen mielletään luotettavaksi, ympäristöystävälliseksi sekä mukavaksi lämmitysmuodoksi. (Pöyry 2011, s. 1-2, 54, Energiateollisuus 2008a, s. 14–15 & Energiateollisuus 2008b, s. 15) Verkon käyttövarmuudesta huolehtiminen voi omalta osaltaan edesauttaa kaukolämmön aseman säilyttämisestä vahvana myös tulevaisuudessa.

Kaukolämpöverkon käyttövarmuus on keskeinen lämmöntoimituksen laadun mitta ja keho käyttövarmuus aiheuttaa helposti tyytymättömyyttä. Lämmöntoimituksen häiriöt aiheuttavat eri asiakastyypeille erilaisia haittoja. Esimerkiksi teollisuuden tuotantolaitoksille käyttökeskeytyksistä voi aiheutua niin teknisiä kuin taloudellisiakin seuraamuksia, mikäli lämmönsaanti on oleellinen tekijä tuotannon kannalta. Tavallisille kuluttajille lämmöntoimituksen katkokset näkyvät lähinnä lämpimän käyttöveden loppumisena ja sisätilojen lämpötilan laskuna, jolloin kysymys on pitemminkin yleiseen mukavuuteen liittyvistä seurauksista olettaen, ettei käyttökeskeytys jostain syystä veny hyvin pitkäksi. (Dalman et al. 1992, s. 18)

Kaukolämpöverkon käyttövarmuuden tasoa ja sen kehittymistä voidaan mitata ja arvioida erilaisten verkon kuntoa kuvaavien tunnuslukujen avulla. Lämmöntoimituksen varmuuteen liittyviksi tunnusluvuiksi voidaan lukea esimerkiksi verkon vauriotiheys (vaurioiden määrä/johtokilometri) sekä lämmöntoimituksen keskimääräinen käyttökeskeytysaika asiakasta kohden. Suomessa vuonna 2010 kaukolämpöverkkojen

vauriotiheys oli keskimäärin 0,08 kpl/km (Energieateollisuus 2011d, s. 2). Kaukolämmön keskimääräinen keskeytysaika asiakasta kohden oli puolestaan 1,70 tuntia, mistä laskettuna kaukolämmön toimitusvarmuus, kaikista eri syistä johtuvat lämmöntoimituskatkokset huomioiden, oli 99,935 %. Pelkästään kaukolämpöjärjestelmän häiriötilanteista (verkon vauriot, tuotantokatkokset) johtuvien keskeytysten osalta keskimääräinen keskeytysaika oli 0,94 tuntia ja toimitusvarmuus tällöin jopa 99,989 %. (Energieateollisuus 2011a, s. 2)

Valtakunnalliset keskiarvoluvut voivat juuri esimerkiksi toimia hyvinä vertailuarvoina kaukolämpöyhtiöille verkon kunnan arvioimiseksi sekä myös omalta osaltaan lähtökohtana käyttövarmuutta korostavan perusparannustarpeen määrittämiseksi. Vaihtoehtoisesti varsinaisen verkon perusparantamisen lisäksi käyttövarmuutta voidaan tuki parantaa myös muin keinoin, kuten kehittämällä verkon rakennetta silmukoimalla ja varayhteyksiä rakentamalla (Åkerström 2004, s. 24).

4.3 Perusparantamisen säästöpotentiaalit ja taloudellinen kannattavuus

Kaukolämpöverkon huonosta kunnosta ja vuotojen korjauksesta voi vuositasolla aiheutua huomattaviakin kuluja, joita voitaisiin leikata johto-osuuksia perusparantamalla. Tällaisiksi säästöpotentiaaleiksi voidaan lukea (Koskelainen et al. 1985, s. 32 & Ljubenko et al. 2011 & Pirvola 1996, s. 63 & Nuorkivi 2005):

- lämpöhäviöt,
- lisävesimenekki (joka tarkoittaa ylimääräisen kaukolämpöveden syöttämistä verkostoon korvaamaan vuotokohdista poistunutta vettä),
- huolto- ja kunnossapitokustannukset,
- korjauskustannukset sekä
- korjausten aiheuttamat välilliset kustannusvaikutukset.

Lisäksi vanhan johdon epäonnistunut mitoitus tai kaukolämmön muuttunut kulutustilanne voi vuositasolla synnyttää tarpeettomia kuluja (Pirvola 1996, s. 13). Taloudellisen analysoinnin suorittaminen edellä mainittuihin tekijöiden tarkastelussa tarjoaa mahdollisuuden esittää perusteltuja saneerausehdotuksia verkon käyttövarmuutta parantavan päämäärän tueksi. Kustannuslaskelmien ongelmana on tosin se, että niihin liittyy melko paljon tulkinnanvaraisuutta ja epävarmuutta, koska tarkastelut ovat

monilta osin varsin hypoteettisia. Esimerkiksi kustannuksia korjaustoimenpiteistä tai käyttökeskeytysten yhteydessä myymättä jääneestä lämmöstä ei edes synny ilman varsinaista vuotoa, jolloin kustannusten laskeminen perustuu aina vuodon todennäköisyyden arviointiin. Vaikka saneerauslaskelmien tuloksiin ei siten voidakaan suhtautua absoluuttisina totuuksina, voivat ne kuitenkin antaa lisäarvoa kustannustasojen sekä kustannusmekanismien hahmottamiseksi.

4.3.1 Lämpöhäviöt

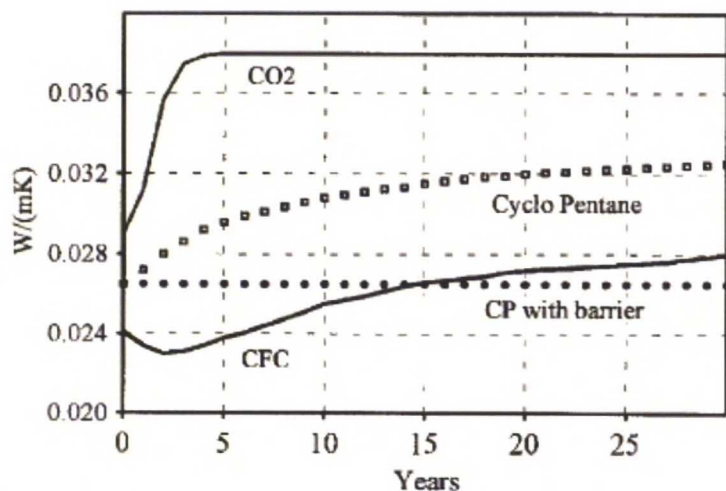
Lämpöhäviöt ovat kaukolämmön jakelun suurin kustannuserä ja suuruusluokaltaan vastaavat lämpölaitosten savukaasuhäviöitä. Suomessa lämpöhäviöt ovat pienissä kaukolämpöverkoissa (putkikoot keskimäärin DN 50) suuruusluokaltaan 10–20 prosenttia ja suuremmissa verkoissa 4–10 (putkikoot keskimäärin DN 150) prosentin luokkaa. Keskimääräisesti koko johtokanta huomioiden lämpöhäviöt ovat Suomessa arviolta noin 9 % (Energiateollisuus 2009, Koskelainen et al. s. 203 & Suomen kaukolämpö ry 2003a, s. 8), jolloin kansainvälisessä vertailussa Suomen lämpöhäviöt ovat varsin alhaiset. Esimerkiksi Euroopan maista Bulgariassa, Kroatiaassa sekä Romaniassa lämpöhäviöt ovat noin 17 prosentin luokkaa ja Norjassa, Islannissa ja Sveitsissäkin keskimäärin yli 16 % (Werner et al. 2006, s. 10). Venäjällä huonokuntoisimmilla johto-osuuksilla häviöiden osuus voi kasvaa jopa 30 prosenttiin (Hlebnikov et al. 2008). Tällaisissa maissa, joissa lämpöhäviöt muodostuvat hyvin suuriksi, liittyy lämpöhäviöiden pienentämiseen tähtäävään perusparantamiseen merkittävä säästöpotentiaali. Esimerkiksi eräässä slovenialaisessa lämpöhäviöiden pienenemistä mittaavassa perusparannustutkimuksessa tutkijat laskivat, että vanhojen johtojen saneeraamisella oli saavutettu lämpöhäviöiden pieneneminen jopa 77 prosentilla (Ljubenko et al. 2011). Suomessa kaukolämpöverkon perusparantamisella ei niinkään ole ensisijaisesti tähdätty lämpöhäviöiden pienentämiseen, sillä Suomessa tähän liittyvä säästöpotentiaali on verraten pieni ja investoinnin takaisinmaksuajat pitkiä. (Energiateollisuus 2008b, s. 1)

Lämpöhäviöiden suuruuteen ja suhteellinen merkitykseen vaikuttavat kaukolämpösystemissä etenkin käytetty eristemateriaali, putkihalkaisija, verkon lämpötilataso, verkon käyttöaste (lämmön myynti per johtometri) sekä

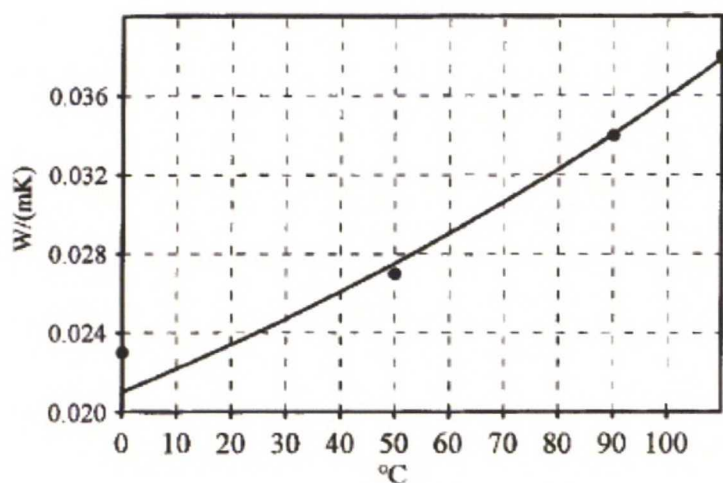
maaperäolosuhteet. Näistä eristeen huono eristävyys, ylisuuret putkidimensiot ja korkea kaukolämpöveden lämpötila lisäävät lämpöhäviöitä. Verkon suuri käyttöaste puolestaan suhteellisesti pienentää häviöitä, jolloin lämpöhäviöt tiheämmin asutuissa kaupungeissa muodostuvat merkitykseltään pienemmiksi kuin harvaan asutummilla alueilla. (Werner et al. 2006, s. 10 & Koskelainen et al. 2006, s. 203) Lämpöhäviöiden minimoimisen kannalta konkreettisin keino säästöjen saavuttamiseen olisi vanhojen kaukolämpöjohtojen korvaaminen uusilla, eristyskyvyltään merkittävästi paremmilla johdoilla. Muihin edellä mainittuihin tekijöihin vaikuttaminen lämpöhäviöiden pienentämisen kannalta on sen sijaan jo huomattavasti vaikeampaa, jopa mahdotonta.

Vanhoja eristeitä, eritoten mineraalivillaa, ajatellen on etenkin eristeiden kastumisella haittaa niiden kunnolle. Mineraalivilla imee veden itseensä välittömästi päästessään sen kanssa kosketuksiin, jolloin samalla eristeen eristyskyky heikkenee. Lisäksi villan kunnollinen kastuminen nostaa sen painoa, mikä aiheuttaa eristeen muodonmuutoksia. Eristeen kourujen saumoihin voi esimerkiksi tämän vuoksi syntyä rakoja ja villan roikkumisen seurauksena eriste voi myös osittain irtautua virtausputkesta. Nämä muutokset ovat luonteeltaan pysyviä, vaikka eriste kuivuisikin. Eristyskyky sinänsä voi kuitenkin säilyä lähes entisellään vielä muutaman kastumisen jälkeenkin. Useiden kastumisten on kuitenkin todettu aiheuttaneen villan sidoshartsien sitomiskyvyn katoamista ja villa on ikään kuin muuttunut ”pelkäksi pölyksi”, jolloin eristyskyvystä ei jää paljoakaan jäljelle. Polyuretaanivaahdon kastuminen ei sen sijaan ole yhtä vaarallista veden ollessa kylmää, sillä umpisoluihin vaahto ei ime vettä sisäänsä. Ongelma muodostuu siinä vaiheessa, kun vuotovedet pääsevät kuumille virtausputkipinnoille, jolloin vesi höyrystyy. Vesihöyry tuhoaa polyuretaanin solukkoa, jolloin se pääsee etenemään myös polyuretaanieristeessä. (Partanen 1984, s. 12) Polyuretaanieristeen eristyskyvyn heikkenemisen suurin syy on sen lämmönjohtavuuden kasvu ikääntymisen seurauksena (kuva 18). Lämmönjohtavuuden kasvu on seurausta eristeen solukkorakenteen sisältämän kaasun (joka tavanomaisesti koostuu syklopentaanin ja hiilidioksidin seoksesta) ja ilman välisestä diffuusiosta ilman hapen ja typen lämmönjohtavuuksien ollessa solukaasun lämmönjohtavuutta suuremmat. (Boer et al. 2008) Ikääntymisen lisäksi myös käyttölämpötilalla on huomattava vaikutus polyuretaanieristeen lämmönjohtavuuteen, jolloin lämpötilan

kasvaessa polyuretaanin eristyskyky heikkenee lämmönjohtavuuden kasvaessa (kuva 19) (Bøhm et al. 2005).

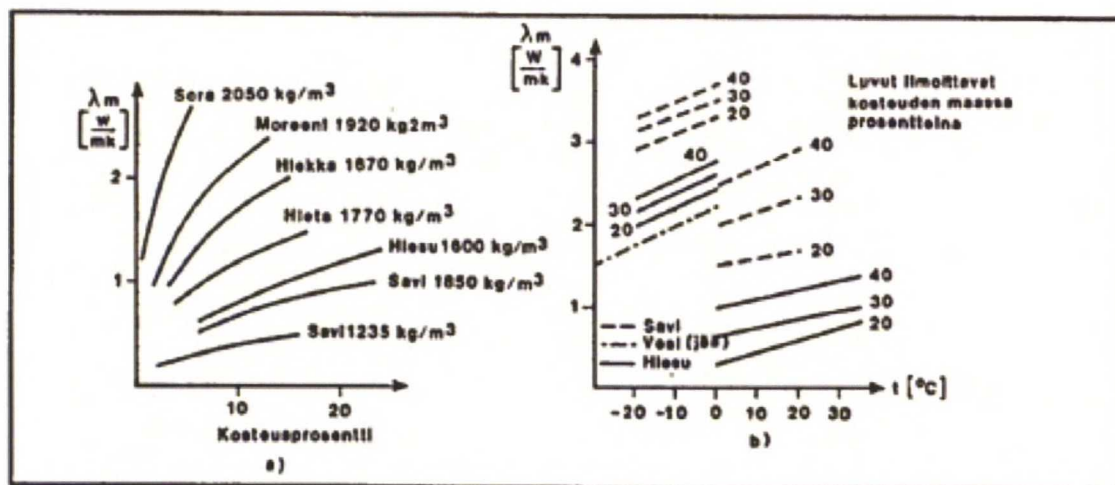


Kuva 18 Lämmönjohtavuuksien kasvu eri polyuretaanivahtotyypille ikääntymisen seurauksena. Eristeen suojakuorella on huomattava vaikutus eristyskyvyn säilymiseen. Lähde: Bøhm et al. 2005



Kuva 19 Käyttölämpötilan vaikutus polyuretaanieristeen lämmönjohtavuuteen. Lähde: Bøhm et al. 2005

Kaukolämpöjohtojen lämpöhäviöitä laskettaessa on eristeiden lämmönjohtavuuden lisäksi huomioitava myös maan lämmönjohtavuus λ_g , joka riippuu kuvan 20 mukaisesti sekä maalajista että kosteudesta (Koskelainen et al. 2006, s. 203).



Kuva 20 Maan lämmönjohtavuuden riippuvuus maalajista ja kosteudesta. Lähde: Koskelainen et al. 2006, s. 203

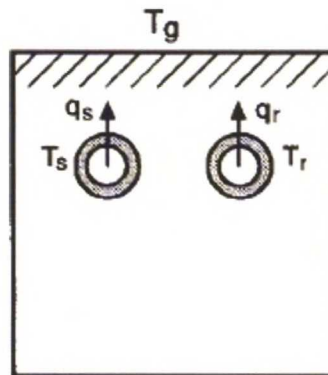
Varsinaista kaukolämpöverkon lämpöhäviöiden laskentaa käsittelevää kirjallisuutta on saatavilla laajasti. Häviöiden mallinnus ja laskeminen on hankalaa, sillä häviöihin vaikuttaviin tekijöihin liittyy paljon epävarmuutta. Tulosten tarkkuus riippuu paljon siitä, kuinka tarkasti ympäristöparametrit pystytään laskentamallissa huomioimaan. (Heller 2002) Yksinkertaisimmissa matemaattisissa laskentayhtälöissä saatetaan esimerkiksi maaperä, ja sen terminen tila, sekä materiaalit olettaa homogeenisiksi. Monimutkaisemmissa malleissa voidaan taas pyrkiä ympäristön tarkempaan mallintamiseen sekä esimerkiksi hyödyntämään kokemuseräistä mittaustietoa ja numeerisia menetelmiä. (Bøhm 2000) Alla on esitetty yksinkertaistettu malli johtojen lämpöhäviöiden arvioimiseksi stationääritilassa. Stationäärin lämmönsiirron yhtälöt soveltuvat keskimääräisten vuotuisten lämpöhäviöiden laskemiseen, mutteivät hetkelliseen tilanteen tarkasteluun, sillä niillä ei pystytä esimerkiksi huomioimaan maaperään varastoituvaa energiaa (Koskelainen et al. 1992, s. 16).

Kaukolämpöjohtojen lämpöhäviöt syntyvät lämmön siirtyessä johdosta maaperään ja siitä edelleen ympäristöön. Osa lämmöstä siirtyy tosin menoputkesta paluuputkeen, jolloin kaikki lämpö ei mene suoraan häviöiksi, vaan palaa lämmöntuotantolaitokselle hyödynnettäväksi. Tämä kuitenkin heikentää siirtokapasiteettia sekä lämpölaitoksen hyötysuhdetta. (Koskelainen et al. 2006, s. 203)

Kuvan 21 perusteella meno- ja paluuputkien lämpöhäviöiden suuruuden määrittämiseksi voidaan kirjoittaa yhtälöt (Bøhm 2000)

$$q_s = U_{1s}(T_s - T_g) - U_{2s}(T_r - T_g) \quad (4.1)$$

$$q_r = U_{1r}(T_r - T_g) - U_{2r}(T_s - T_g) \quad (4.2)$$



Kuva 21 Lämpöhäviöiden määrittäminen kiinnivaahdotetuille erillisputkille. Lähde: Bøhm 2000

Olettamalla putket symmetrisiksi voidaan merkitä, että $U_{1s}=U_{1r}$ ja $U_{2s}=U_{2r}$. Summaamalla yllä olevat yhtälöt saadaan siten kokonaislämpöhäviöiksi

$$q_{tot} = q_s + q_r = 2(U_1 - U_2) \left(\frac{T_s - T_r}{2} - T_g \right) \quad (4.3)$$

joissa	q_s	= lämpöhäviöt menoputkesta
	q_r	= lämpöhäviöt paluuputkesta
	T_s	= menoputken lämpötila (°C)
	T_r	= paluuputken lämpötila (°C)
	T_g	= häiriöttömän maaperän lämpötila (°C)
	U_1, U_2	=lämmönläpäisylukuja (W/m, °C)

Lämmönläpäisykertoimien U_1 ja U_2 arvot riippuvat eristeen, maaperän sekä putkien keskinäisen vuorovaikutuksen aiheuttamista lämpövastuksista. Symmetristen kaukolämpöputkien tapauksessa ne voidaan laskea kaavoista

$$U_1 = \frac{R_g + R_i}{(R_g + R_i)^2 - R_h^2} \quad (4.4)$$

$$U_2 = \frac{R_s}{(R_g + R_i)^2 - R_h^2} \quad (4.4)$$

jossa R_g = maaperän lämpövastus

R_i = eristeen ja vaipan lämpövastus

R_h = putkien keskinäisen vaikutuksen huomioiva lämpövastus

Kokonaislämpöhäviöiden laskemista varten yhdistämällä U_1 ja U_2 saadaan kokonaislämmönsiirtokertoimeksi

$$U_1 - U_2 = \frac{1}{R_g + R_i + R_h} \quad (4.5)$$

Kaavat lämpövastusten laskemiseksi kiinnivaahdotettujen muovisuojakuorijohtojen (2Mpuk) ja betonielementtikanavien tapauksessa on esitetty liitteessä 1.

4.3.2 Lisävesikustannukset

Kaukolämpösystemien vesihäviöt ovat yksi lämmönsiirtoon liittyvistä pääongelmista, mutta siitä huolimatta niitä on tutkittu melko vähän. Pääosa vesihäviöistä syntyy asiakkaiden lämmönsiirtimissä, mutta suuri osa hävikistä on myös seurausta kaukolämpöjohtojen vuodoista. Häviövesi on korvattava syöttämällä verkkoon lisävetä. Esimerkiksi Suomessa kaukolämpöverkkojen kiertovesi vaihtuu keskimäärin kerran vuodessa. Vuotojen osalta lisävesimenekkiä pystytään vähentämään huonokuntoisia johto-osuuksia perusparantamalla. (Nuorkivi 2005, s. 24, 48, 110)

Lisävetä valmistetaan raakavedestä, joka ennen verkkoon syöttämistä on käsiteltävä poistamalla siitä happi sekä muita epäpuhtauksia virtausputkien sisäpuolisen korroosion estämiseksi. Nykyisin kaukolämpövesi usein myös värjätään väriaineella helpottamaan mahdollisten vuotojen löytymistä. (Koskelainen et al. 2006, s. 360–368) Raakaveden

hankinta ja käsittely aiheuttavat kustannuksia, joiden lisäksi lisäveden valmistuskustannuksiin on vielä luettava syöttöveden lämmityksestä menoveden lämpötilaan aiheutuvat kulut. Edellä mainitut tekijät nostavatkin verkkoon syötettävän lisäveden hintaa huomattavasti verrattuna tavalliseen vesijohtoveteen. Vielä tarkempaan kustannusvaikutusten arviointiin pyrittäessä voitaisiin kuluerittelyssä huomioida myös lisäveden pumppauksesta aiheutuvat ylimääräiset kustannukset (Partanen 1983, s. 2). Esimerkiksi Vantaalla lisäveden valmistuskustannukset ovat suuruusluokaltaan noin 3,5 €/m³ (Mansner 2012), jolloin vuotokohdista maastoon karkaava kaukolämpövesi muodostaakin helposti kaukolämpöyritykselle huomattavan lisämenoerän, mikäli lisävettä joudutaan valmistamaan suuria määriä.

Teoreettisesti virtausputken yksittäisestä reiästä ulos vuotavan veden määrää pystytään approksimoimaan kaavalla (Thornton 2003 & Greyvenstein et al. 2007):

$$Q = Cd \cdot A \cdot \sqrt{2gH_{pk}} = Cd \cdot A \cdot \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (4.6)$$

jossa

Q = vuotoveden tilavuusvirta (m³/s)

Cd = purkautumiskerroin

A = vuotoreiän pinta-ala (m²)

g = gravitaatiokiihtyvyys (9,81 m/s²)

H_{pk} = virtaavan aineen painekorkeus ($\Delta p = \rho g H_{pk}$) (m)

Δp = paine-ero (Pa)

ρ = veden tiheys (kg/m³)

Purkautumiskertoimen ja vuotokohdan pinta-alan tulo kuvaa sitä tehokasta vuotopinta-alaa, josta vesi pääsee todellisuudessa virtaamaan ulos. Reikämaisille vuotokohdille purkautumiskertoimeksi oletetaan usein noin 0,8 ja railomaiselle 0,6 (Tabesh 2009). Yleisemmässä muodossa kaava 4.6 voidaan kirjoittaa

$$Q = cH_{pk}^{\alpha} \quad (4.7)$$

jossa c on vuotovakio ja α vuotoeksponentti. Todellisuudessa eksponentti α voi olla arvoa 0,5 huomattavasti suurempi, likipitään jopa 2,8, jolloin vuotoveden määrä voi siten riippua paineesta selkeästi voimakkaammin kuin mitä kaavalla 4.6 saataisiin. Vuotoeksponentin suuruuteen vaikuttaa keskeisesti esimerkiksi vuotokohdan muoto. (van Zyl et al. 2007)

Käytännössä kaukolämpömaailman vuotovesimäärien arvioimiseen kaavan 4.6 hyödynnettävyys ei kuitenkaan ole parhain. Vuotopinta-alaa, sen muotoa tai niiden kehittymisestä on ensinnäkin äärimmäisen vaikea mallintaa. Kaukolämpöjohtojen vuodot koostuvat yleensä yksittäisten pistemäisten vuotojen sijaan pitemminkin useista ohuen neulan mentävistä tihkurei'istä. Isommat vuotoreiät puolestaan repeävät hyvin nopeasti ilman, että ne ehtisivät vapaasti vuotaa kovinkaan kauaa. Yleensäkin ottaen kaukolämpövuodot havaitaan kohtalaisen nopeasti. Piilevien, suhteellisen ”maltillisesti” kehittyvien, vuotojen olemassaolon mahdollisuus rajoittuu lähinnä betonielementtikanaaviin, joista pieniä, repeämättöminä säilyviä pistemäisiä vuotoja ei välttämättä huomata. (Siitonen 2012)

Vaikka vuotokohdat ovat yleensä pieniä ja ne havaitaan yleensä varsin nopeasti, voi lisävetä vuotojen takia silti kulua vuodessa tuhansiakin kuutioita. Vuodoista aiheutuvien lisävesikustannusten suuruusluokkien havainnollistamiseksi tarkastellaan teoreettisesti menopuolen virtausputkessa piilevää tulitikun mentävää reikää, jonka halkaisija on 3 mm. Oletetaan paine-eroksi 9 bar ja kaukolämpöveden menolämpötilaksi 85 °C, jolloin kaukolämpöveden tiheys on noin 0,97 kg/dm³. Käyttämällä vuotoeksponentin arvoa 0,5 ja olettamalla purkautumiskertoimeksi 0,7 saadaan kaavalla 4.6 vuotoveden tilavuusvirraksi

$$Q = Cd \cdot \pi r^2 \cdot \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} = 0,7 \cdot \pi \cdot (1,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{9 \cdot 10^5 \text{ Pa}}{0,97 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} \approx 0,77 \text{ m}^3/\text{h}$$

Eli vuoden aikana tulitikun kokoisesta reiästä vuotaisi vettä 0,77 m³/h · 8760 h ≈ 6 720 m³ ja vuodosta aiheutuva kustannus olisi 6 720 m³ · 3,5 €/m³ ≈ 23 500 €.

4.3.3 Huolto- ja kunnossapitokustannukset

Kaukolämpöverkkojen kunnossapidon merkittävien käyttökustannustekijä ovat verkon huoltokohteiden säännöllinen kunnonvalvonta huoltosuunnitelman mukaisesti. Kunnossapitokustannusten leikkaaminen edellyttääkin useimmiten kaukolämpöverkkoon tehtäviä rakenteellisia muutoksia. (Pirvola 1996, s. 63)

Huoltokohteiden määrä on paljolti sidoksissa johtorakenteeseen ja esimerkiksi uudella kiinnivaahdotetulla järjestelmällä pystytään vähentämään huoltokohteiden määrää verrattuna vapaasti liikkuviin järjestelmiin. Uusissakin järjestelmissä tarvitaan toki edelleen välttämättömiä sulku-, tyhjennys- ja ilmanpoistoventtiileitä, mutta ne vaativat selvästi vähemmän huoltoa ja ovat lisäksi rakenteellisesti paremmin suojattuja vanhoihin järjestelmiin verrattuna. Vanhoilla järjestelmillä kaivoihin kertyneen ulkopuolisen veden poisto on yksi kunnossapitohenkilöstä työllistävimmistä toimenpiteistä, kun taas uusilla johtotyypeillä ei vastaavaa pumppaustarvetta esiinny, sillä niissä ei ole sisäistä vesivuotojärjestelmää eikä kansistojenkaan läpi päässyt vesi yleensä kerry rakenteisiin. (Pirvola 1996, s. 63, 65) Käytännössä kunnossapitokustannusten leikkautumisen arviointi perusparantamisen ansiosta on pohdittava aina erikseen johto-osuuskohtaisesti.

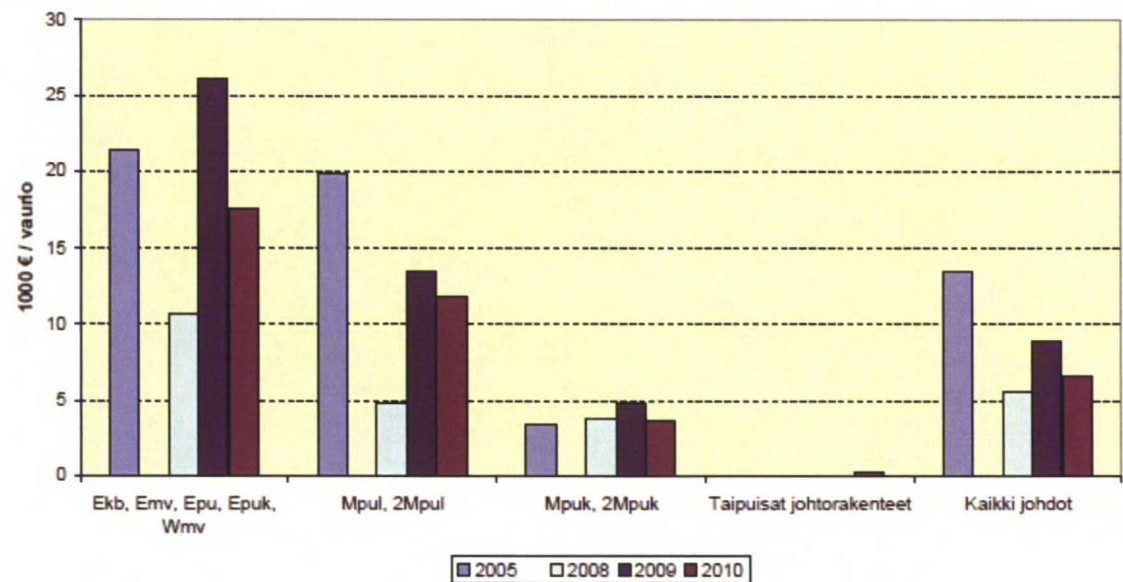
4.3.4 Vuotojen korjauskustannukset

Kaukolämpöverkon vaurioiden korjaamiseen liittyy useita eri kustannustekijöitä, jotka voidaan jaotella suoraan korjaamiseen liittyviin kustannuksiin sekä käyttökeskeytyksiin liittyviin välillisiin kustannuksiin, joiden osuus käyttökeskeytyksen luonteesta riippuen voi muodostua huomattavaksikin. Suoria kustannuksia syntyy esimerkiksi omien työntekijöiden palkoista, maanrakennustöistä sekä hitsausurakoitsijoiden käytöstä. Välillisten kustannusten piiriin voidaan puolestaan lukea esimerkiksi käyttökeskeytysten aikana myymättä jäänyt lämpö sekä keskeytyksistä aiheutuviin tuotannollisiin rajoituksiin liittyvät menetykset. (Partanen 1983, s. 2-3 & Pulakka 1987, s. 8).

Vaurioiden suorat korjauskustannukset vaihtelevat hyvin tapauskohtaisesti. Yleisesti ottaen vanhojen putkien korjaus- ja uusimistöiden metrihinta nousee lähes

poikkeuksetta korkeammaksi kuin uudisrakentamisen metrihinta, joskus jopa kaksin- tai kolminkertaiseksi. Kustannuksiin eniten vaikuttavia tekijöitä ovat korjauskohteena oleva johtorakenne, putken dimensio, olosuhteet sekä vuotokohdan uusimisaste. Yleensä putken korjaus edellyttää käytännössä sen vaihtoa, sillä vain harvoin syöpymät ovat niin paikallisia, että ne olisivat korjattavissa täyttöhitsauksella tai paikkalapulla. Äkilliset tai talvisaikaan sattuneet vuodot voidaan tilapäisesti korjata esimerkiksi asentamalla vuotokohtaan korjauspanta ja varsinainen korjaus suorittaa paremmin sopivana ajankohtana. (Partanen 1983, s. 2-6, Pulakka 1987, s. 2-8, Siitonen 2012)

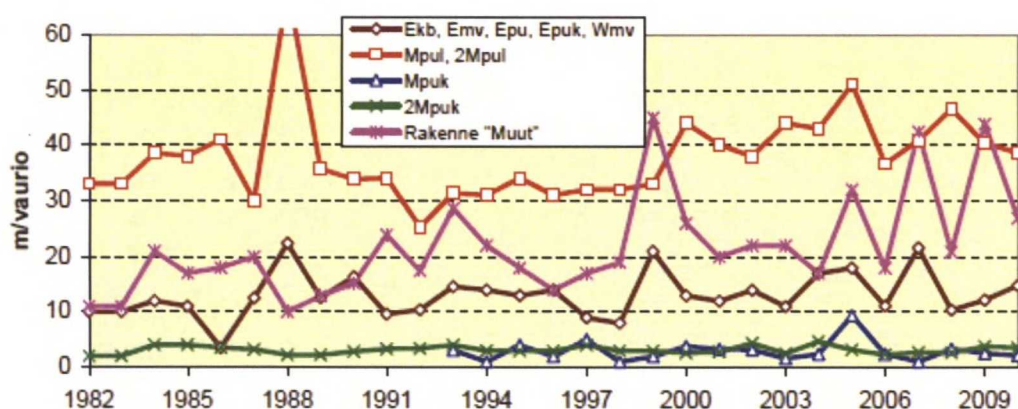
Kuvassa 22 on esitetty ET:n julkaisemasta vauriotilastosta saatu kuvaaja keskimääräisistä kustannuksista vauriota kohden eri johtorakenteilla ajanjaksolla 2005–2010. Lukuja voidaan pitää lähinnä suuntaa antavina, sillä esimerkiksi vuoden 2010 keskiarvoista puuttuu etenkin isompien lämpöyhtiöiden kustannustietoja ja todellisuudessa kustannukset voivat kivuta jopa kaksinkertaisiksi. (Energiateollisuus ry 2011d, s. 6)



Kuva 22 Kaukolämpöjohtojen vaurioiden korjauskustannukset. Lähde: Energiateollisuus 2011d, s. 22

Suurimmat korjauskustannukset ovat tilastojen mukaan liikkuvaputkisissa järjestelmissä eli betonielementtikanaavilla ja fiskars-rakenteella. Kustannusten suuruuteen vaikuttaa keskeisesti se, että näiden rakenteiden tapauksessa vuotoputken uusimistarve vuotoa kohden on selkeästi kiinnivaahdotettua johtoa suurempi (kuva 23). Liikkuvarakenteisissa johdoissa vuotovedet pääsevät kulkeutumaan vapaammin, jolloin

ne kastelevat eristeet ja tuhoavat virtausputkea paljon pidemmältä matkalta. Kiinnivaahdotetuissa johdoissa vauriot jäävät sen sijaan yleensä hyvin paikalliseksi ja uusittava johtopituus lyhyeksi. Tosin kiinnivaahdotettujenkin johtojen korjauskustannukset voivat nousta nopeasti, jos vuodon paikantaminen ei tahdo onnistua ja joudutaan suorittamaan useita koekaivauksia ennen vuotokohdan löytymistä (Siitonen 2012). Vanhojen rakenteiden osalta osa uusitusta johtopituudesta on voinut liittyä myös korjaustyön yhteydessä tehtyyn perusparannukseen, jolloin uusittu johtopituus on ollut pidempi kuin mitä varsinainen korjaus olisi edellyttänyt. (Pulakka 1987, s. 2-4, Sirola 2004 & Energiategollisuus 2011d, s. 2)



Kuva 23 Vauriota kohti uusittu johtopituus 1982-2010. Lähde: Energiategollisuus 2011d, s. 16

4.3.5 Korjausten välilliset kustannukset

Kaukolämpövuotojen korjaamisen yhteydessä lämmöntoimitus joudutaan useimmiten keskeyttämään osalle kaukolämpöasiakkaista, jolloin vuotojen korjauksesta aiheutuu varsinaisten korjauskustannusten lisäksi myös välillisiä kustannuksia lämmön tuotanto- ja myyntitappioiden muodossa. Häiriötilanteissa osa kaukolämmöstä voi jäädä kokonaan myymättä asiakkaille, mutta merkittävin välillinen kustannusvaikutus syntyy kuitenkin siitä, kun lämmöntuotantoa joudutaan siirtämään yhteistuotannosta lämpökeskuksiin.

Kiinteistön lämpöenergian kulutus jakaantuu rakennuksen ja lämpimän käyttöveden lämmitykseen, joista vuoden aikana lämmitykseen liittyvä osuus asuinrakennuksissa on noin 75 % ja lämpimän käyttöveden loput 25 %. Rakennusten lämpötehontarve vaihtelee vuodenajan ja satunnaisten säätilan vaihteluiden mukaan ollen suoraan

verrannollinen sisä- ja ulkolämpötilojen erotukseen. Lämpimän käyttöveden kulutusta voidaan puolestaan kuukausitasolla pitää vakiona ja ulkolämpötilasta riippumattomana, sen toisaalta vaihdellessa voimakkaasti vuorokausitasolla. (Kara et al. 2004, s. 188 & Koskelainen et al. 2006, s. 53–61)

Käyttökeskeytysten yhteydessä kiinteistöjen lämpötilat laskevat jonkin verran, mutta palaavat taas normaaleiksi keskeytyksen ollessa ohi. Käytännössä kiinteistöt kuluttavat siten suurin piirtein saman verran kaukolämpöä lämmitykseen, vaikka lämpö olisikin poikki. Tällöin asiakkaille jäisi itse asiassa myymättä vain lämpimän käyttöveden osuus kiinteistön kokonaislämpöenergian kulutuksesta. (Kortelainen 2012)

Normaaliluontoisten ja kotitalousasiakkaita koskevien sekä suluilla edes kohtuullisen hyvin rajattavissa olevien käyttökeskeytysten tapauksessa myymättä jääneen lämmön kustannukset jäävätkin siten taloudellisessa mielessä melko merkitsemättömiksi. Toisaalta käyttökeskeytysten koskiessa myös esimerkiksi tuotantoprosesseihinsa lämpöä tarvitsevia tehtaita voi myymättä jääneen lämmön arvo kasvaa merkitseväksikin.

Toisinaan korjaukset etenkin suuremmissa siirtolinjoissa, joiden siirtokapasiteettia ei pystytä korvaamaan vaihtoehtoisella siirtoyhteydellä, saattavat rajoittaa syntyvän lämmönsiirtorajoituksen vuoksi lämmöntuotantomahdollisuuksia sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa, jolloin välilliset kustannusvaikutukset voivat olla jo tuntuvia. Lämmöntuotantorajoituksen myötä menetetään samalla yhteistuotantovoimallaitoksen rakennusasteen (sähkön ja lämmön tuottosuhde) mukaisesti energiantuotantoprosessissa syntyvän sähkön määrä. (Kara et al. 2004, s. 74) Tällöin korjauksesta aiheutuviin välillisiin kustannuksiin on luettava mahdollisesti myymättä jäävän lämmön lisäksi yhteistuotantoa korvaavan lämmön tuottaminen kalliimmalla lämpökeskuksissa sekä tuottamatta jääneestä sähköstä menetetty kate. (Siitonen 2012).

Kappaleessa 6.4 on Vantaan kaukolämpöverkosta otettujen esimerkkien avulla tarkasteltu käyttökeskeytyksen aiheuttamia sekä lämmöntuotannollisia että -myynnillisiä kustannusvaikutuksia.

4.3.6 Putkidimension muuttaminen

Kaukolämpöjohdoissa siirtyvä lämpöteho riippuu kappaleessa 2.3 esitetyn kaavan 2.1 mukaisesti kiertävästä vesivirrasta ja lämpötilaerosta (jäähtymästä). Lämpötilaeron pysyessä muuttumattomana määrittää vesivirta putkien siirtokapasiteetin. Koska putkissa virtaavan veden massavirta voidaan kirjoittaa

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \rho A w = \rho \pi \frac{D_s^2}{4} w, \quad (4.8)$$

jossa \dot{m} = virtaavan veden massavirta [kg/s]

ρ = veden tiheys [kg/m³]

\dot{V} = veden tilavuusvirta [m³/s]

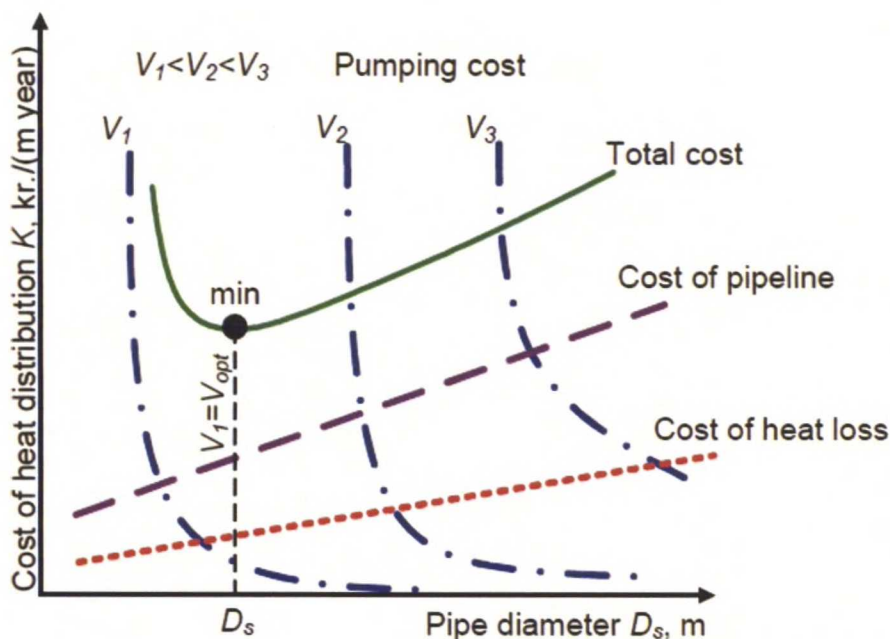
A = virtausputken poikkipinta-ala [m²]

w = virtauksen nopeus [m/s]

D_s = virtausputken halkaisija [m]

huomataan, että sama lämpöteho pystytään toimittamaan joko kasvattamalla putken dimensiota, jolloin veden virtausnopeus pienenee tai vaihtoehtoisesti pienentämällä dimensiota, jolloin virtausnopeus kasvaa.

Kaukolämpöjohtojen putkikoon valitseminen on osittain kustannuksia minimoiva optimointitehtävä, jossa on huomioitava niin putkien materiaali- ja rakennuskustannukset kuin lämpöhäviö- sekä pumppauskustannuksetkin. Näistä kolmesta tekijästä putkikustannukset ja lämpöhäviöt kasvavat kuvan 24 mukaisesti putkidimension kasvaessa, kun taas pumppauskustannukset pienenevät. (Hlebnikov et al. 2007)



Kuva 24 Putki-, lämpöhäviö- ja pumppauskustannukset putkidimension funktiona. Lähde: Hlebnikov et al. 2007

Lämpöhäviöiden kasvu johtuu putkien vaippapinta-alan kasvusta. Pumppauskustannusten aleneminen johtuu puolestaan kitkan aiheuttamien painehäviöiden pienenemisestä, kun virtausnopeus laskee virtausputken poikkipinta-alan kasvaessa (kaava 4.8) veden tilavuusvirran pysyessä samana. Virtauksen painehäviöt ovat likipitään verrannolliset virtausnopeuden toiseen potenssiin ja häviöt putkimetriä kohti voidaan kirjoittaa (Hlebnikov et al. 2007 & Koskelainen et al. 2006, s. 198–203):

$$\Delta p_v = \frac{\xi}{D_s} \cdot \frac{\rho w^2}{2}, \quad (4.9)$$

jossa	Δp_v	= painehäviö (Pa/m)
	ξ	= kitkakerroin
	ρ	= veden tiheys (kg/m ³)
	D_s	= putken sisähalkaisija (m)
	w	= veden virtausnopeus (m/s)

Putkidimension muuttamisen vaikutukset pumppaustehon tarpeeseen pystytään määrittämällä painehäviöt eri tilanteissa ja laskemalla häviöiden muutosta vastaava pumppausteho kaavalla (Koskelainen et al. 2006, s. 170):

$$P_p = \frac{\dot{m}gH}{\eta} = \frac{\dot{V}\rho gH}{\eta} = \frac{\dot{V}\Delta p_v}{\eta} \quad (4.10)$$

jossa P_p = pumppausteho (W)
 η = pumpun hyötysuhde
 \dot{m} = veden massavirta (kg/s)
 \dot{V} = veden tilavuusvirta (m³/s)
 H = pumpun nostokorkeus (m)
 Δp_v = paine-ero (painehäviö) (Pa)

4.3.7 Kustannukset ja laajuuden määrittäminen

Kaukolämpöverkon perusparantaminen vaatii runsaasti pääomaa, mikä asettaa olennaisimman rajoitteen perusparannettavien kohteiden määrälle ja laajuudelle. Perusparantamisen pääkustannustekijät muodostuvat materiaalikustannuksista, putkitöistä sekä maanrakennuksesta (Pirvola 1996, s. 69). Lisäksi kuluja syntyy oman henkilökunnan tarvittavasta työpanoksesta sekä esimerkiksi välillisinä kustannuksina käyttökesekeytysten yhteydessä myymättä jääneestä lämmöstä. Joitakin tekijöitä, kuten imagollisia vaikutuksia, ei kustannuslaskelmissa yhteismitallisesti voida edes huomioida.

Perusparantamisen kustannusten etukäteen arviointia hankaloittaa, että metrikohtaiset kustannukset vaihtelevat huomattavasti perusparannettavasta johdosta ja työkohteiden vaativuudesta riippuen. Kokemustieto sekä aiemmin toteutuneiden kustannusten tarkastelu voivat kuitenkin auttaa arvioimaan odotettavissa olevia kustannuksia. Merkittävimmät yksikkökustannuksiin vaikuttavista tekijöistä ovat (Pirvola 1996, s. 69 & Siitonen 2012):

- perusparannuskohteen laajuus,
- uuden johdon DN-koko,

- rakenteellisten epäjatkuvuuskohteiden määrä uusittavalla johto-osalla (haaroitukset, kaivot ym.),
- rakentamisvuoden urakkahinnoittelu ja johtomateriaalin hintataso,
- perusparannettava johtorakenne,
- lupa jättää vanha rakenne maahan sekä
- rakentamisympäristö (esimerkiksi perusparantaminen vilkkaasti liikennöidyllä kaupunki-/tiealueella vs. reuna-alueilla kadunrakennustöiden yhteydessä).

Joissain tapauksissa uusimiskustannukset voivat olla jopa hyvin lähellä uudisrakentamisen kustannustasoa (taulukko 1). Toisaalta taas esimerkiksi useat rakenteelliset epäjatkuvuuskohdat voivat nostaa kahden, muilta osin samantyyppisten, johto-osuuksien kustannuseron kaksin- tai jopa kolminkertaiseksi. Kalleimpia perusparannuskohteita ovat usein betonielementtikanaavat monestakin eri syystä: Ne ovat ensinnäkin kooltaan tyypillisesti verkon suurimpia, mikä nostaa niin materiaali- kuin rakentamiskustannuksia. Toisekseen raskaiden betonirakenteiden purkaminen on hankalaa ja nostotyö voi edellyttää erikoiskaluston tilaamista työmaalle. Lisäksi, koska suuri osa betonielementtikanaavista on verkossa siirtojohdon asemassa, voidaan lämmönjakelu joutua järjestämään väliaikaisyyhteydellä. (Pirvola 1996, s. 69–71) Vanhojen rakenteiden tapauksessa verkon rakennetta voidaan myös haluta yhdenmukaistaa, jolloin samalla perusparannetaan vielä hyväkuntoisiakin johto-osuuksia (Energiateollisuus 2008b, s. 3).

Taulukko 1 2Mpuk-johtojen verottomat rakentamiskustannukset Suomessa vuoden 2010 kyselytulosten perusteella. Lähde: Energiateollisuus 2011e, s. 3

DN	Kustannukset keskimäärin (€/m)	DN	Kustannukset keskimäärin (€/m)
20	131	150	276
25	229	200	319
32	0	250	427
40	181	300	429
50	178	400	711
65	209	500	853
80	178	600	1944
100	240	700	1092
125	264		

Edellä luetellut perusparantamiseen liittyvät kustannustekijät ovat luonteeltaan pitkälti sellaisia, ettei niihin liity säästömahdollisuuksia. Laajempien perusparannuskohteiden tapauksessa kokonaiskustannuksiin voidaan kuitenkin pyrkiä vaikuttamaan vertailemalla, kannattaisiko perusparannus toteuttaa kertaparannuksena vai osittamalla. Lyhyemmissä perusparannuskohteissa kertaparannus tulee osittamista halvemmaksi pienempien yksikkökustannusten ansiosta, sillä kiinteäluontoisten kulujen (kuten kalustoon siirtoon liittyvien kustannusten) suhteellinen merkitys pienenee kerralla perusparannettavan matkan kasvaessa. Pisimpien kohteiden tapauksessa edullisuusjärjestys voi kuitenkin muuttua, kun laskelmissa huomioidaan saavutettavissa olevat korkokustannussäästöt, mikäli osa investoinnista siirretään ajallisesti eteenpäin. Jotta korkosäästöt kompensoisivat korkeammat yksikkökustannukset, edellyttää se riittävän pitkää aikaväliä perusparannusten välillä. Perusparantamatta jääneen osuuden kestäminen viivytyksen ajan ei kuitenkaan ole varmaa ja mahdolliset korjauskustannukset syövät nopeasti viivytttämisestä saavutettavan hyödyn. Lisäksi viivytämisen kannattavuutta laskettaessa tulisi huomioida myös muut perusparantamiseen liittyvät säästöpotentiaalit, kuten lämpöhäviöiden pieneneminen. Kaukolämmön imagon kannalta ei myöskään ole hyväksi, jos perusparantamisen viivytämisen seurauksena sama johto-osuus on muutaman vuoden aikana jatkuvasti auki. (Pirvola 1996, s. 13, 70 ja 98–99) Varmana ja turvallisena keinona kustannussäästöjen saavuttamiseksi voidaan sen sijaan ainakin käyttää yhteydenpitoa muihin maanalaisiin rakennustöitä suorittavaan toimijoihin yhteistoimintamahdollisuuksien löytämiseksi ja kustannusten jakamiseksi.

4.3.8 Kannattavuuden määrittäminen

Tässä työssä perusparantamisen taloudellisen kannattavuuden määrittämisessä on käytetty kolmea eri investoinnin kannattavuuden tunnuslukua: investoinnin nettonykyarvoa (net present value, NPV), sisäistä korkokantaa (internal rate of return, IRR) sekä korotonta takaisinmaksuaikaa.

Nykyarvomenetelmässä kaikki investoinnista aiheutuvat rahavirrat eli kustannukset ja tuotot diskontataan nykyhetkeen tuottovaatimuksen mukaisella korkokannalla ja summataan yhteen käyttäen kaavaa (Leppiniemi et al. 2002, s. 87):

$$NPV = CF_0 + \frac{CF_1}{(1+r)^1} + \frac{CF_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1+r)^n} = CF_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad (4.11)$$

jossa CF_t = vuoden t kassavirta
 r = tuottovaatimus

Investointi on taloudellisesti kannattava, jos saatu nykyarvo on positiivinen (Leppiniemi et al. 2002, s. 88). Pääoman tuottovaatimus saadaan yrityksen vieraan pääoman ja oman pääoman kustannusten perusteella (Ikäheimo et al. 2005, s. 215). Tässä työssä kustannuslaskelmaosiossa (kappale 7.3) tuottovaateena on käytetty Vantaalla lämpöpuolen investointeihin sovellettavaa 8 prosentin korkokantaa, johon on sisällytetty myös inflaatio. Tämän vuoksi kassavirtoihin on ennen nettonykyarvon laskemista lisätty odotettu inflaatio (2 %). Investoinnin pitoaikana (t) on puolestaan käytetty 30 vuotta.

Sisäisen korkokaavan laskentakaava muistuttaa hyvin nettonykyarvon kaavaa, sillä IRR-menetelmällä haetaan sitä investoinnin sisäistä korkokantaa, jolla investoinnin nettonykyarvo on nolla. IRR voidaan tällöin laskea ratkaisemalla korko r kaavasta (Leppiniemi et al. 2002, s. 91):

$$NPV = CF_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} = 0 \quad (4.12)$$

Mitä suurempi on IRR, sen tuottavampi on investointi. Jos saatu IRR on pienempi kuin investoinnin tuottovaatimus, ei investointi ole taloudellisesti kannattava (Leppiniemi et al. 2002, s. 92).

Takaisinmaksuajan määrittämisessä ideana on selvittää, kuinka monen vuoden kuluttua investointi maksaa itsensä takaisin. Investoinnin koroton takaisinmaksuaika saadaan tällöin laskettua kaavalla (Leppiniemi et al. 2002, s. 94):

$$\text{koroton takaisinmaksuaika} = \frac{\text{Alkuinvestointi}}{\text{Vuotuinen nettokassavirta}} \quad (4.13)$$

Koroton takaisinmaksuaika on helppo laskea, mutta sen heikkoutena on kuitenkin, ettei se huomioi rahan aika-arvoa, mikä etenkin pitkäaikaisilla investoinneilla vääristää todellista takaisinmaksuaikaa.

4.4 Verkon kunnan määrittäminen

Kaukolämpöjärjestelmän kunnossapidon voidaan katsoa jakaantuvan verkon huoltotoimintaan ja kunnanvalvontaan, joiden tavoitteiksi voidaan lukea esimerkiksi verkon vikaantuvuuksien estäminen, käytettävyyden parantaminen, häviöiden pienentäminen sekä ongelmakohteiden kartoittaminen. Kaukolämpöjohtojen maanalainen sijainti tekee niistä kuitenkin äärimmäisen haastavan kunnossapidettävän kohteen, minkä vuoksi kunnossapitotoiminta rajoittuukin paljolti kaivoihin, avojohtoihin ja mittauskeskuksiin. (Koskelainen et al. 2006, s. 347–348) Toisaalta maanalaisiin kaukolämpöjohtoihin on kuitenkin sitoutunut suuria ja pitkäaikaisia investointeja (Koskelainen et al. 2006, s. 26) ja niiden asianmukaisen kunnanvalvonnan laiminlyönti voi tulevaisuudessa johtaa merkittäviin taloudellisiin menetyksiin sekä verkon käytettävyyden vaarantumiseen.

Kaukolämpöjohtojen kunnanvalvonta on olennainen keino tehdä johtopäätöksiä verkon tilasta sekä määrittellä kunnossapitotoiminnan ja perusparannustoiminnan tarvetta. Suomessa kaukolämpöverkon maanalaisten osien kunnanvalvonnan vähimmäisedellytyksenä pidetään verkon kuntoon yhteydessä olevien tunnuslukujen (kuten korjauskustannukset/johtopituus tai lisäveden vuosikulutus/verkon kokonaistilavuus) mittaamista, niiden kehittymisen seuraamista sekä vertailua valtakunnallisiin vertailuarvoihin. Muita käytettävissä olevia keinoja verkon kunnanvalvontaan ja arviointiin ovat esimerkiksi (Koskelainen et al. 2006, s. 347–348, Suomen kaukolämpö ry 1999, s. 10–12 & Energiateollisuus 2011b):

- riskialueiden kartoitus,
- kaukolämpökaivojen tarkastukset (Kaivot kertovat paljon myös itse kanavien voinnista: jos kaivo on huonokuntoinen, niin kanava on luultavasti vielä huonokuntoisempi (Partanen 1984, s. 14)),
- maan pintalämpötilojen mittaukset,
- putkistojen videokuvaukset sekä

- verkon rasituskokeet (Verkon lämpötilan ja paineen nosto lähelle maksimia ennen lämmityskauden alkua, jolloin huonokuntoisten osien rasittamisella saadaan vauriokohdat esiin).

Käytännössä luotettavien tietojen kerääminen ja niistä johtopäätösten teko on kuitenkin haastavaa, jolloin johtojen perusparantamistarpeesta on usein tehty virheellisiä arvioita (Koskelainen et al. 2006, s. 348).

4.5 Perusparannuskohteista päättäminen

Motiiveja perusparantamiselle sekä potentiaalisia perusparannuskohteita verkkojen ikääntyessä löytyy usein varmasti runsaasti, kun taas resursseja perusparantamiselle yleensä rajallisesti. Toteutettavasti perusparannuskohteista päättäminen voi muodostua hyvinkin hankalaksi tehtäväksi, ja se edellyttää lämpöyhtiöitä tekemään linjauksia siitä, mitkä kriteerit nostetaan tärkeimmiksi, jotta resurssit kyetään allokoimaan järkevimmin lämmöntoimituksen varmistamiseksi. Päättäntäprosessia ohjaaviksi kriteereiksi on valittavissa esimerkiksi (Energiateollisuus 2008b, s. 15)

- johtorakenne,
- merkitys lämmönjakelun kannalta,
- merkitys ihmisten turvallisuuden kannalta (esimerkiksi yhteydet sairaaloihin),
- vauriohistoria,
- johto-osuuden huoltotarve jne.

Kriteereitä voidaan käyttää johto-osuuksien luokittelussa eri tärkeysluokkiin ja tärkeysluokkia systemaattisen perusparannussuunnittelun (muun kuin korjauksen yhteydessä suoritettua perusparantamista) apuna. Korkeamman tärkeysluokituksen saavat johto-osuudet tulisi perusparantaa ensitilassa ja matalamman luokan kohteita resurssien vapautuessa.

Johtojen tärkeysluokittelun ohjatessa systemaattista perusparannussuunnittelua voi joissain tilanteissa olla myös kannattavaa poiketa kriteeriluokittelun osoittamasta perusparannusjärjestyksestä. Esimerkiksi kommunikoinnilla ja yhteydenpidolla muiden toimijoiden, kuten vesivoimalaitoksen, kanssa voi tarjoutua mahdollisuuksia rakennustöiden ajoittamiseksi samalle alueelle samanaikaisesti. Tällöin kyetään mahdollisesti saavuttamaan kustannussäästöjä ja vähentämään alueen asukkaille

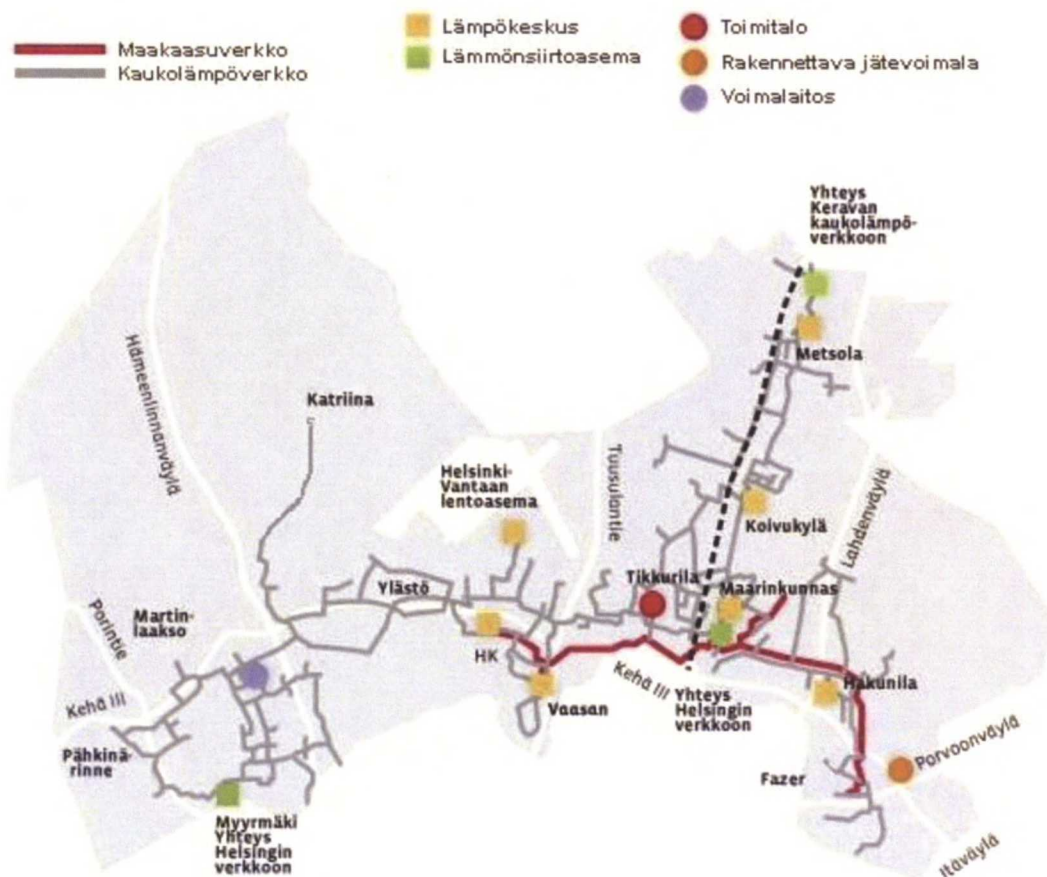
koituvaa häiriön määrää, kun samaa paikkaa ei tarvitse kaivaa auki useana vuotena peräkkäin.

5 Vantaan Energian kaukolämpöverkko

Kaukolämpötoiminta alkoi Vantaalla vuonna 1969, jolloin aloitettiin verkon ja lämpökeskusten rakentaminen sekä Martinlaakson voimalaitoksen suunnittelu. Yhtenäisen rakenteen sijaan verkko muodostui aluksi useista pienemmistä alueverkkoista, joissa lämpö tuotettiin verkon omassa lämpökeskuksessa. Alueverkkojen yhtenäistyminen alkoi pikku hiljaa energialaitoksen ostaessa niitä haltuunsa.

Kaukolämpötoiminta perustui pelkkään lämpökeskustuotantoon vuoteen 1975 asti, jolloin valmistui Martinlaakson voimalaitoksen vanhin yksikkö (Martinlaakso 1) ja päästiin aloittamaan sähkön ja lämmön yhteistuotanto. Martinlaakso 1 oli alun perin öljykäyttöinen, mutta vuonna 1989 se muutettiin maakaasukäyttöiseksi. Voimalaitoksen tuotantokapasiteettia kasvatettiin vuonna 1982 kivihiilellä toimivalla Martinlaakso 2:lla ja vuonna 1995 kaasuturbiinilaitoksella. Voimalaitoksen yhteenlaskettu sähköteho on nykyisellään noin 195 MW ja lämpöteho 330 MW. Lisäksi laitosalueella on huippu- ja varatehontarvetta varten pelkkää kaukolämpöä tuottava kattilalaitos, jonka lämpöteho on 60 MW. Vanhin Martinlaakson voimalaitoksen tuotantoyksiköistä tulee käyttöikänsä loppuun viimeistään vuonna 2015, minkä vuoksi Itä-Vantaalle Långmossebergeniin on vuonna 2014 määrä valmistua uusi sähköä ja lämpöä tuottava jätevoimalaitos. Toisaalta uudella voimalaitoksella vastataan samalla myös kaupungin orgaanisesta kasvusta johtuvaan lämpöenergian kysynnän lisääntymiseen. Lämpökeskuksia on vielä jäljellä 6 kappaletta ja niissä polttoaineina käytetään maakaasua sekä öljyä.

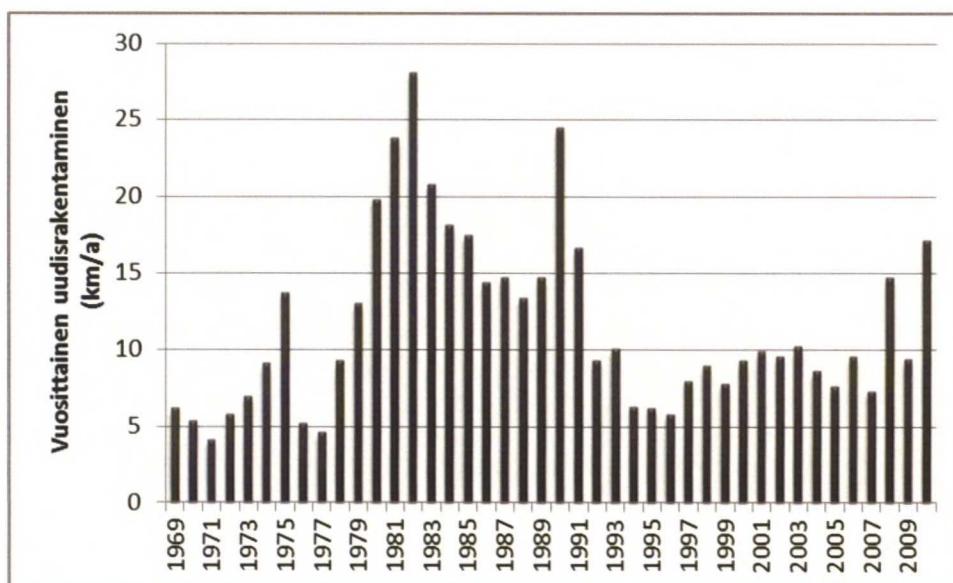
Vantaan lämmöntuotannon ja -jakelun ongelmien varalta Vantaan Energian kaukolämpöverkko on lisäksi yhdistetty Rajatorpassa ja Kuninkaalassa Helsingin Energian kaukolämpöverkkoon sekä Leppäkorvessa Keravan Energian kaukolämpöverkkoon apukapasiteetin saamiseksi. Kuvasta 25 näkyy Vantaan kaukolämpöverkon suurimmat linjat vuoden 2010 lopussa sekä nykyisen Martinlaakson voimalaitoksen, uuden jätevoimalan, lämpökeskusten ja lämmönsiirtoasemien sijainnit.



Kuva 25 Vantaan kaukolämpöverkko, voimalaitokset, lämpökeskukset sekä lämmönsiirtoasemayhteydet Keravalle ja Helsinkiin. Lähde: Vantaan Energia 2012

5.1 Vantaan kaukolämpöjohtokanta

Vuodesta 1969 lähtien Vantaan kaukolämpöverkon pituus on kasvanut joka vuosi. Rakennustahti on kuitenkin vaihdellut huomattavasti vuosien mittaan (kuva 26). Aktiivisinta uudisrakentaminen on ollut 1980-luvun taitteesta 1990-luvun alkuun, jolloin useampana vuonna verkon pituus kasvoi yli 20 kilometriä ja enimmillään jopa 28 kilometriä. Hiljaisimpina vuosina rakennusmäärät ovat jääneet alle 20 prosentin huippuvuosien tasosta ja useana vuotena verkon laajentuminen on jäänyt noin 5 kilometrin pätkään. Kuvasta 26 on esimerkiksi havaittavissa 1990-luvun laman vaikutus rakennustahdin hiipumisena.

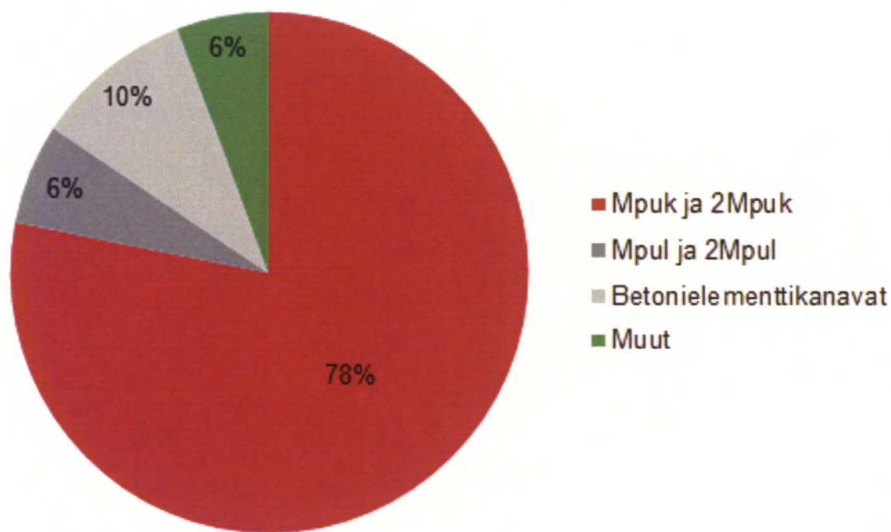


Kuva 26 Vantaan kaukolämpöverkon uudisrakentamistahti ajanjaksolla 1969-2010. Lähde: Vantaan Energia 2012

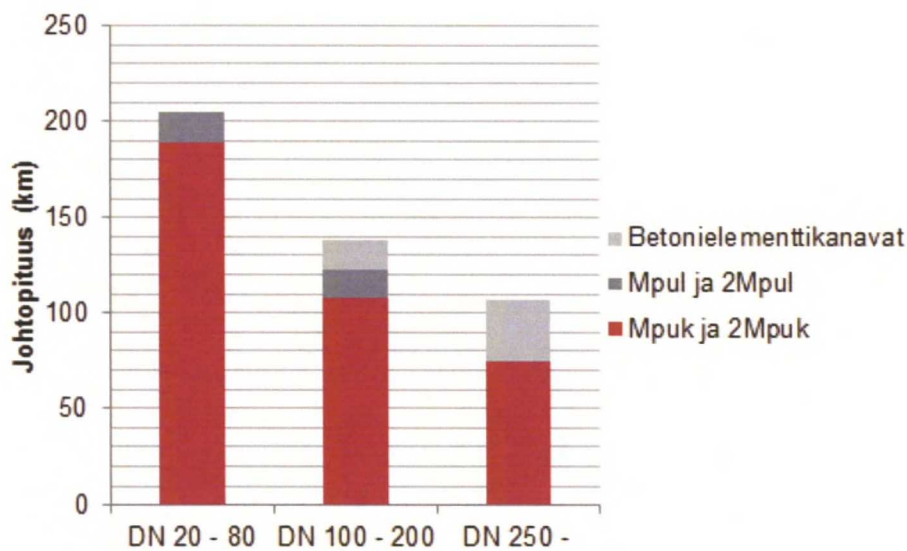
Vuoden 2011 lopussa Vantaan kaukolämpöverkon kokonaispituus oli noin 483 kilometriä. Vuoden 2011 aikana verkko laajeni 7,6 kilometrillä, josta 1,3 kilometrin osuus liittyi syksyllä 2011 aloitettuun jätevoimalan kaukolämpöliittymän rakennusprojektiin. Liittymisjohdon rakentuminen ajoittuu useammalle vuodelle ja uuden yhteyden kokonaispituudeksi tulee noin 6,5 kilometriä. Viime vuosina Vantaan kaukolämpöverkon pituus on kasvanut pituutta keskimäärin reilun 2 prosentin vuosivauhdilla. Potentiaalia verkon laajentumiseen on paljon vielä tulevaisuudessakin kaupungin kasvun ja kehittymisen myötä.

Vantaan pitkä kaukolämpöhistoria näkyy sen johtokannassa myös eri aikakausina rakentamisessa suosittujen johtotyyppien myötä. Vanhimmat, vielä nykyisinkin käytössä olevat, johto-osuudet ovat 1970-luvulta, jolloin rakentamisessa käytettiin betonielementtikanavia. Betonielementtikanavia on verkossa edelleen paljon siirtojohtoina, eikä niitä esiinny lainkaan alle DN 200 -kokoisina. Nykyisin niiden osuus johtokannasta on noin 10 prosenttia. Betonielementtikanavien käyttö päättyi Vantaalla 1980-luvun lopulle tultaessa, jolloin siirryttiin käyttämään yksinomaan kiinnivaahdotettuja muovisuojakuorisia kaukolämpöjohtoja (Mpuk ja 2Mpuk). Vanhimmat kiinnivaahdotetut johdot ovat peräisin 1970-luvulta ja tällä hetkellä rakenne on verkon yleisin noin 80 prosentin osuudella. Kiinnivaahdotetun kaksiputkijohdon (Mpuk) osuus on tosin hyvin marginaalinen, ja rakennetta löytyy verkosta kaiken

kaikkiaan alle 200 metriä. 2Mpuk-johtoa löytyy Vantaalta kaikista kokoluokista talohaaroista siirtolinjoihin. Kolmannen pääryhmän Vantaan johtokannassa muodostaa fiskars-rakenne noin 6 prosentin osuudella. Fiskars-johtoa käytettiin Vantaalla 1960-luvun lopusta 1980-luvun taitteeseen asti ja rakennetta löytyy vain kokoluokasta DN 40-DN 200. Vantaan kaukolämpöverkon johtotyyppien jakauma on esitetty kuvassa 27. Kuvasta 28 käy taas puolestaan ilmi kolmen pääjohtorakenteen osuudet eri kokoluokissa. (Vantaan Energia 2012)



Kuva 27 Kaukolämpöjohtojen rakennejakauma Vantaalla vuonna 2010.



Kuva 28 Kaukolämpöjohtojen eri kokoluokkien osuudet Vantaalla 2010.

Kuvan 27 johtorakennejakaumassa ryhmään ”muut” kuuluvia rakenteita ovat esimerkiksi himaniittikanavat sekä betonikourut. Näistä kaukolämpöjohdoista suuri osa on perintöä Vantaan alueverkkoajoilta ja tiedot niistä ovat osittain melko puutteelliset senaikaisen huonon dokumentaation takia.

Alueverkkohistoria on huomattavissa Vantaan verkkokarttaa tarkastelemalla myös muista ominaispiirteistä, kuten yksittäisistä ahtaista johto-osuuksista ja toisaalta selkeästi tarpeettoman suurista talohaaroista. Kohtuuttoman väljät talohaarat vanhemmilla verkkoalueilla selittyvät usein sillä, että ne ovat aikoinaan toimineet siirtolinjoina lämpökeskuksista. Perusparantamisen yhteydessä niiden dimensio voidaan muuttaa pienemmäksi. Ahtaita johto-osuuksia esiintyy etenkin alueverkkojen yhdysjohdoissa.

Kaupunkirakenteen hajanaisuuden takia Vantaan pääsiirtoverkossa on suhteellisen paljon säteishaaroja. Rakenteellisesti verkko muistuttaa tällöin heinäkasaa, josta suuntautuu haaroja moneen eri suuntaan ilman lenkitysten muodostumista. Lenkitysten puuttumisen takia lämmönsiirto vaihtoehtoisia reittejä pitkin ei monesti ole mahdollista, minkä vuoksi lämmönkeskeytysten yhteydessä suuri asiakaskunta voi jäädä ilman lämpöä. Joissain tapauksissa lenkitys saattaa jopa olla olemassa, mutta liian pienen putkidimension takia sen avulla ei pystytä siirtämään tarpeeksi lämpötehoa, jotta sitä voitaisiin käyttää korvaavana yhteytenä. Toinen käyttökeskeytysten vaikutusalueisiin vaikuttava tekijä on sulkuventtiilien sijoitus. Sulkuja on rakennusvaiheessa saatettu säästösyistä jättää talohaaroista pois, jolloin nyt suluttomien talohaarojen korjaamisen yhteydessä vesikierto voidaan joutua katkaisemaan siirtojohdostakin, mikä aiheuttaa toimituskatkon monille muillekin asiakkaille.

5.2 Verkon kunnossapito

Vantaan Energialla kaukolämpöverkon kunnossapito mielletään omaisuudenhoidoksi, jolla on keskeinen merkitys kaukolämpötoiminnan laadun ylläpitämisessä. Toisaalta käytännön kunnossapitotoiminnassa hankittu kokemus sekä verkon erikoistuntemus ovat ensiarvoisen tärkeitä tekijöitä äkillisten häiriötilanteiden ilmaantuessa ja niistä selviytymisessä. Ennakoivan kunnossapidon piiriin kuuluvia tärkeimpiä huoltokohteita

ovat kaukolämpöasiakkaiden lämmönjakohuoneet sekä kaukolämpöverkon kaivot. Kaivoihin tehtävät tarkistuskäynnit ovat myös osa verkon silmämääräistä kunnonvalvontaa, minkä lisäksi verkon tilaa tarkkaillaan myös esimerkiksi ajelemalla huoltoautoilla kaukolämpölinjoja pitkin. Kaukolämpöverkkoa korjaavaan työhön kunnossapitohenkilökunta osallistuu puolestaan hoitamalla esimerkiksi putkivuotojen väliaikaiset korjaukset sekä toimimalla urakoitsijoiden apuna myös vaurioiden varsinaisessa korjauksessa. (Siitonen 2012)

Vantaalla kaukolämmön kunnossapitotoimintaa ollaan tulevaisuudessa tehostamassa siirtymällä käyttämään sähköistä kunnossapito-ohjelmaa ennakoivan kunnossapidon perustuessa nykyisellään paperisten karttojen ja tarkastuslomakkeiden käyttöön. Siirryttäessä uuden mobiilin järjestelmän käyttöön kunnossapitotyöntekijät saavat käyttöönsä mobiililaitteet, joiden avulla löytyvät muun muassa kaivojen tarkat paikkatiedot sekä navigointiohjeet ja niiden avulla voidaan sekä tarkastella että syöttää kunnossapitotietoja. Uudistuksen ansiosta esimerkiksi huoltoreitit kyetään suunnittelemaan entistä paremmin sekä valvomaan, että kaikki kohteet tulevat käytyä läpi. Myös tietojen päivittäminen helpottuu ja reaaliaikaistuu siirryttäessä pois paperisten lomakkeiden täytöstä.

Kunnossapitotoiminnan kehittämiseksi Vantaalla on otettu osaa myös erilaisiin kunnossapitotoimintaa kehittäviin pilottihankkeisiin. Esimerkiksi tällä hetkellä käynnissä on kokeilu, jossa tärkeimpiin tuulettuvien kaukolämpöjohtojen kaivoihin asennetaan kaukokäyttöiset langattomat kaivohälytinlaitteet. Laitteet mittaavat kaivossa olevan veden määrää, lämpötilaa sekä kosteutta, jotka viestittävät myös mahdollisista kaukolämpöjohtojen vuodoista. Asetusarvojen ylittyessä laite antaa hälytyksen, minkä jälkeen henkilökunta käy tarkastamassa tilanteen. Tällöin kosteus ja mahdolliset vuodot kyetään havaitsemaan ajoissa ja korjausten suorittamiseen saadaan enemmän aikaa. Toisaalta hälytysjärjestelmän voidaan katsoa myös lisäävän verkon käyttövarmuutta äkillisten vuotojen ja käyttökeskeytysten vähentyessä. (Torri 2008)

Perusparantamisen näkökulmasta edellä mainitunlaiset kehityshankkeet omalta osaltaan helpottavat perusparannussuunnittelua tiedon saatavuuden ja luotettavuuden parantuessa. Riskikohteiden tunnistamisen ohella vanhojen johto-osuuksien käyttö on

turvallisempaa, mikä edesauttaa resurssien kohdistamisessa käyttövarmuuden kannalta tärkeimpiin kohteisiin.

5.3 Kaukolämpöverkon vauriot ja käyttövarmuus

Vuodesta 2001 lähtien Vantaan Energialla on tilastoitu kaukolämpöverkossa syntyneet vuodot Excel-taulukoihin. Taulukoihin kerätyt tiedot vuodoista ovat olleet: vuotojohdon koko, johdon rakennusvuosi sekä johtotyyppi, vuotokohdan sijaintitieto ja verkkomestarin arvio vuodon aiheuttajasta. Lisäksi tilastoihin on pyritty kirjaamaan vuodon korjaamisesta aiheutuneen käyttökeskeytyksen kesto, lämmönkeskeytyksestä kärsivien asiakkaiden lukumäärä, käyttökeskeytysalueen sopimusteho sekä ulkolämpötila korjaushetkellä.

Kesällä 2011 vuosien 2001–2010 vuototiedot koottiin yhteen vauriohistorian tarkempaa tarkastelua varten. Tilastomateriaalia analysoimalla pyrittiin vetämään johtopäätöksiä verkon kunnosta ja tyypillisimmistä vaurioista, pohtimaan vaurioiden aiheuttamia seurauksia sekä määrittelemään vauriomääriin vaikuttavia riskitekijöitä Vantaalla. Kymmenen vuoden aikana tilastoituja vuotoja oli kertynyt yhteensä 556 kappaletta. Seuraavissa kappaleissa on esitetty tarkemmin tilastojen käsittelystä saatuja tuloksia.

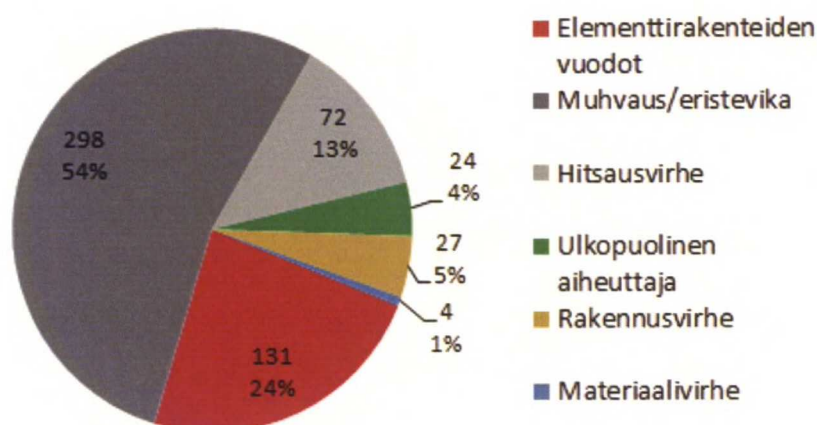
5.3.1 Tyypillisimmät johtovauriot

Kaukolämpöjohtoihin sattuneiden vuotojen syyt oli vuosien mittaan kirjattu vapaamuotoisesti, minkä vuoksi vaurioiden läpikäyminen aloitettiin muodostamalla kuusi eri vauriosyyluokkaa, joihin kaikki vauriot jaettiin tulosten analysoinnin helpottamiseksi. Kategorioinnissa käytetyt luokat olivat:

1. eriste/muhvausvirhe,
2. hitsausvirhe,
3. elementtirakenteiden vuodot,
4. rakennusvirhe
5. ulkopuolinen aiheuttaja sekä
6. materiaalivika.

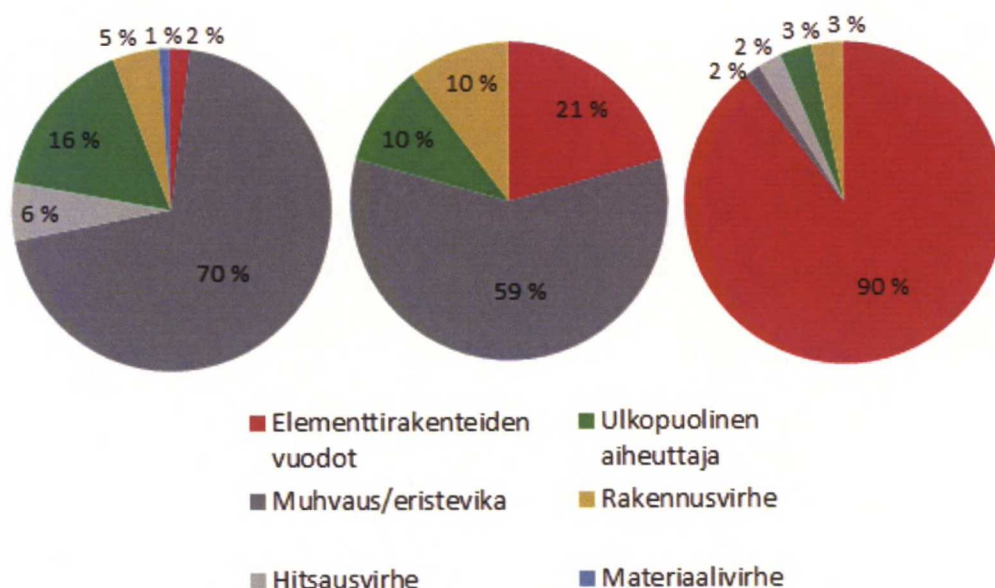
Eriste/muhvausvikaryhmään luokiteltiin tapaukset, joissa ulkopuolinen vesi oli päässyt sisään johtorakenteisiin muovisuojakuorijohtojen liitoskohdista ja syövyttänyt reiän teräksiseen virtausputkeen. Selkeästi suurin osa tähän luokitelluista vuodoista johtui viallisesta kutisteliitoksesta. Hitsausvirheluokkaan luettiin vuodot, joissa kaukolämpövesi oli päässyt syövyttämään putkea epäonnistuneesta teräsputken hitsistä. Elementtirakenteiden vuotoihin on luokiteltu elementtirakenteiden vauriot, joissa ulkopuolinen vesi oli päässyt rakenteisiin vuotavista elementtisaumoista sekä tippuvesisyöpymät veden tiputellussa elementtilinjan kaivojen välyksistä virtausputken pinnalle. Lisäksi tähän ryhmään jaoteltiin myös muutama muiden rakenteiden kaivojen kansistojen vuoto (vastaavanlaisen syntymekanismien perusteella). Kaukolämpöjohtojen vaurioitumiseen johtaneisiin rakennusvirheisiin luokiteltiin kaukolämpölinjan rakentamiseen liittyneet virheet, kuten epäonnistuneet läpiviennit sekä johtokaivantojen epäasianmukaiset täytöt, joidenka seurauksena esimerkiksi terävät kivet ovat saattaneet tehdä reiän johdon suojaan. Tähän ryhmään on niin ikään sisällytetty muutama rakennusvirheiden takia vuotavien kansistojen aiheuttama vuoto. Materiaalivioiksi on luettu vauriot, jotka ovat olleet johdoissa jo niiden tullessa tehtaalta.

Kaikki johtorakenteet huomioiden hallitsevaksi vauriosyyksi paljastuivat tilastojen perusteella muovisuojakuorijohtojen liitoskohtien eriste/muhvausviat, joiden osuus oli yli puolet kaikista vaurioista (kuva 29). Tulos on siten tältä osin samaa luokkaa kuin muuallakin Suomessa keskimäärin (kappale 4.2) ja liitoskohtia voidaan näin ollen pitää myös Vantaalla kaukolämpöverkon heikoimpana lenkkinä. Myös teräsputkien hitsausvirheet olivat hyvin lähellä koko Suomen keskiarvoa ja niiksi oli tunnistettu noin 13 % vuodonaiheuttajista (Suomessa vuonna 2010 11 %). Muilta osin Vantaan ja Energiateollisuus ry:n tilastojen vertailu oli ongelmallista johtuen Vantaan Energian tarkoituksiin laaditun ja Energiateollisuus ry:n käyttämän kategorioinnin eroavaisuuksista. Toiseksi yleisimmäksi vauriosyyksi Vantaalla muodostuivat elementtirakenteiden vuodot noin neljänneksen osuudella. Ulkopuolisen aiheuttajan synnyttämien vaurioiden ja rakennusvirheiden osuudet olivat samaa suuruusluokkaa eli noin 5 %. Materiaalivirheiden osuus jäi hyvin marginaaliseksi: Tehtaalta asti johdoissa olleiden materiaalivikojen suhteellinen osuus oli vain noin yhden prosentin luokkaa, mikä kappalemääräisesti merkitsi neljää vauriota kymmenen vuoden aikana.



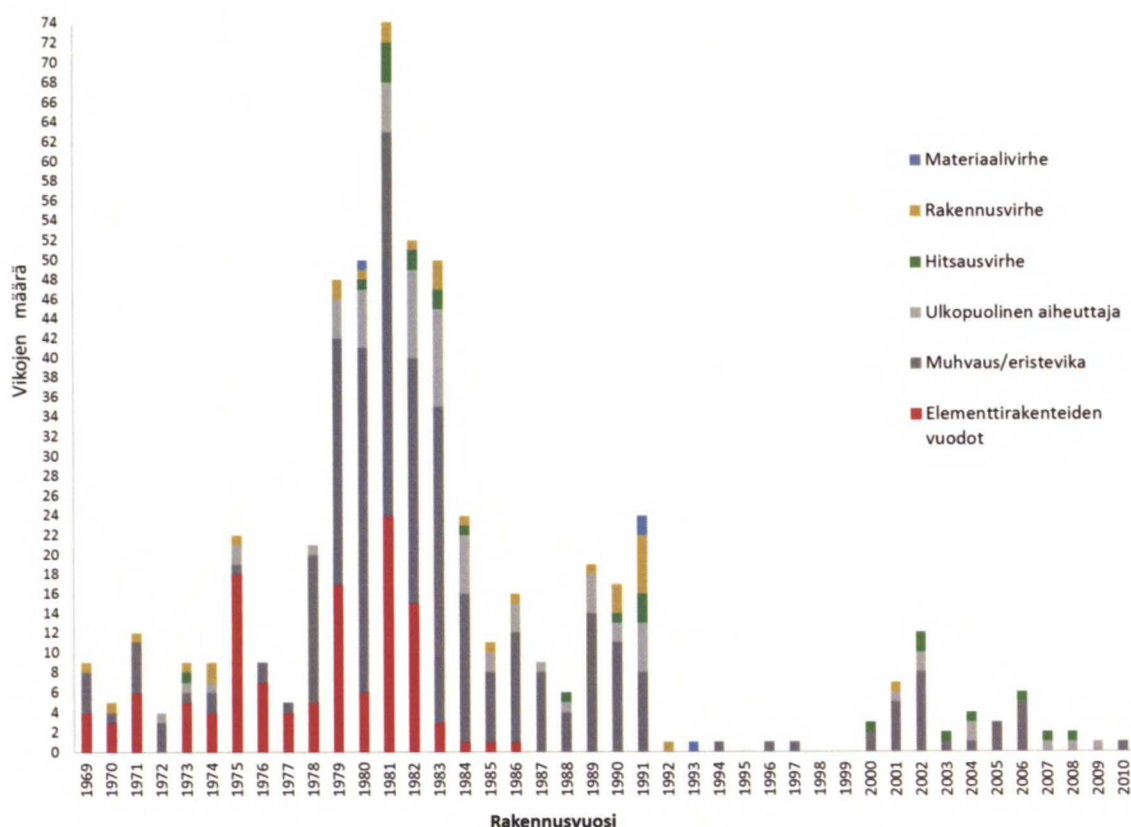
Kuva 29 Ajanjakson 2001–2010 johtovaurioiden absoluuttiset ja suhteelliset osuudet 10 vuoden aikana kaikki johdot huomioiden.

Pääjohtotyyppien erillistarkastelu korosti vielä kaukolämpöjohtojen liitos- ja saumakohtien vaurioitumisherkkyttä (kuva 30) ja niiden suhteelliset osuudet nousivat korkeammaksi kuin Suomessa keskimäärin. Etenkin betonielementtikanavia koskevien elementtirakenteiden vuotojen (saumat ja kaivonkannet) osuus (90%) oli silmiinpistävän suuri.



Kuva 30 Vasemmalta oikealle 2Mpuk-, Mpul- ja betonielementtikanavajohtojen vauriosyiden jakaantumukset.

Suurin osa Vantaalla tällä hetkellä korjattavista kaukolämpöjohdoista on peräisin 1980-luvulta (kuva 31 alla). Tästä ei kuitenkaan suoraan voida tehdä johtopäätöstä, että rakentamisen laatu olisi eritoten tuolloin ollut huonoa. Ilmiö selittyy osittain myös sillä, että 1980-luvulla uutta kaukolämpöjohtoa rakennettiin hyvin paljon (kuva 26), jolloin on odotettavissakin, että myös vaurioita ilmaantuu lukumäärällisesti muita vuosia enemmän. Kappaleessa 5.3.2 on tarkemmin tarkasteltu verkon vikaantuvuutta suhteutettuna vuotuisiin rakennusmääriin sekä pohdittu yhteyttä rakentamisen laadullisiin kysymyksiin.



Kuva 31 Eri vuosina rakennettujen kaukolämpöjohtojen vaurioiden määrät Vantaalla ajanjaksolla 2001-2010.

1980-luvun taitteen vauriosyiden jakautumisesta voidaan huomata myös siirtyminen betonielementtikanavien rakentamisesta muovisuojakuorijohtojen käyttöön: samanaikaisesti, kun betonielementtirakenteiden vuodot ovat vähentyneet radikaalisti, ovat hallitsevaksi vuodon aiheuttajiksi nousseet muovisuojakuorijohtojen liitosten

muhvaus/eristeviat. Fiskars-johtoihin usein liitettävä huono maine ei sen sijaan näy kuvassa 31 erityisenä muhvaus/eristevikojen piikkinä 1970-luvulla rakennettujen johtojen kohdalla. Tässä yhteydessä on kuitenkin muistettava, että tarkastellut vauriot ovat sattuneet viimeisimpien kymmenen vuoden aikana, jolloin huonokuntoisimmat ja epäonnistuneimmat fiskars-johto-osuudet on ehditty jo perusparantaa. Toisaalta tilasto osoittaa myös, että vuonna 1970-luvulla rakennetut fiskars-johdotkin ovat säilyneet käytössä yli 30 vuotta, kun ympäristöolosuhteet ovat olleet suotuisat. Uusimmissa kaukolämpöjohdoissa esiin tulleet vauriomäärät ovat olleet hyvin vähäisiä ja etenkin merkilläpantavaa on, ettei rakennusvirheiksi luokiteltuja vuodonaiheuttajia ole raportoitu kuin yksi.

5.3.2 Kaukolämpöverkon vikaantuvuus Vantaalla

Kaukolämpöjohtojen vikaantuvuutta (johtovaurioita/johtokilometri) tutkimalla voidaan arvioida verkoston nykykuntoa sekä sen kehittymistä. Toisaalta historiatiedoista johdettua vauriotiheyttä voidaan yrittää käyttää hyväksi ennustettaessa johto-osuuksien vaurioriskin todennäköisyyttä tulevaisuudessa: mikäli samalla johto-osuudella esiintyy vuotoja tiheään tahtiin, vihjaa se koko johto-osuuden olevan huonossa kunnossa. Toistuvat korjaukset samassa paikassa voivat viitata esimerkiksi huonoon rakennuslaatuun tai nykyisen johtorakenteen sopimattomuudesta alueen maasto-olosuhteisiin. Tällöin lisävuotojen ja toistuvien yksittäisten korjaustöiden välttämiseksi tulisi harkita koko johto-osuuden perusparantamista.

Vantaalla kesällä 2011 tehty tilastokoonti antoi mahdollisuuden tutkia vikaantuvuutta vain kymmenen vuoden vauriotapausten perusteella. Ottaen kuitenkin huomioon, että Vantaan kaukolämpöhistoria alkaa jo 1970-luvun taitteesta, on ajan kuluessa ehtinyt tapahtua jo paljon, mikä ei tuoreimmista tilastoista piirretyistä kuvaajista käy ilmi. Esimerkiksi Energiateollisuus ry:n vuosittain julkaisemassa vauriotilastossa vastaava aikajana alkaa jo 1980-luvun taitteesta. Suhteellisen lyhyen ajanjakson vuoksi luotettavien johtopäätösten tekeminen verkon yleiskunnon kehityksestä ja vaikuttamista on ongelmallista.

Kuvassa 32 on esitetty, miltä Vantaan kaukolämpöverkon vikaantuvuuden kehitys näyttää tilastojen valossa ajanjaksolla 2001–2010. Vikaantuvuus on ilmoitettu kaikille pääjohtotyypeille erikseen laskemalla kunkin johtotyyppin vaurioiden lukumäärä kunakin tilastovuotena ja jakamalla tämän jälkeen saatu vaurioiden määrä kyseessä olevan johtotyyppin tarkasteluvuoden kokonaispituudella. Vertailun vuoksi kuvaan on laskettu myös kaikki johtotyypit huomioiva yhteisvikaantuvuus. Vuoden 2010 verkon vikaantuvuuden arvoksi saatiin 0,15 kpl/km vastaavan arvon ollessa Suomessa keskimäärin 0,08 kpl/km (Energiateollisuus 2011d, s. 2).



Kuva 32 Kaukolämpöverkon vikaantuvuuden kehitys Vantaalla ajanjaksolla 2001–2010.

Kuvan 32 perusteella joidenkin johtotyyppien, kuten fiskarsin, vikaantuvuus näyttäisi sahaavan voimakkaasti. Tämä ei kuitenkaan välttämättä tarkoita, että joinakin vuosina vuotoja pelkästään syntyisi muita vuosia enemmän. Kyse voi myös olla siitä, ettei vuotoja vain löydetä vuosittain samaan tahtiin niiden olemassa olostu huolimatta. Esimerkiksi kylminä ja lumisina vuosina verkon vikaantuvuus voi lyhyessäkin ajassa näyttää kasvavan paljon lauhempiin vuosiin verrattuna, koska ”kunnon talviaikaan” ympäristöä lämpimämmät vuotokohdat on helpompi havaita. (Ojansuu 2012)

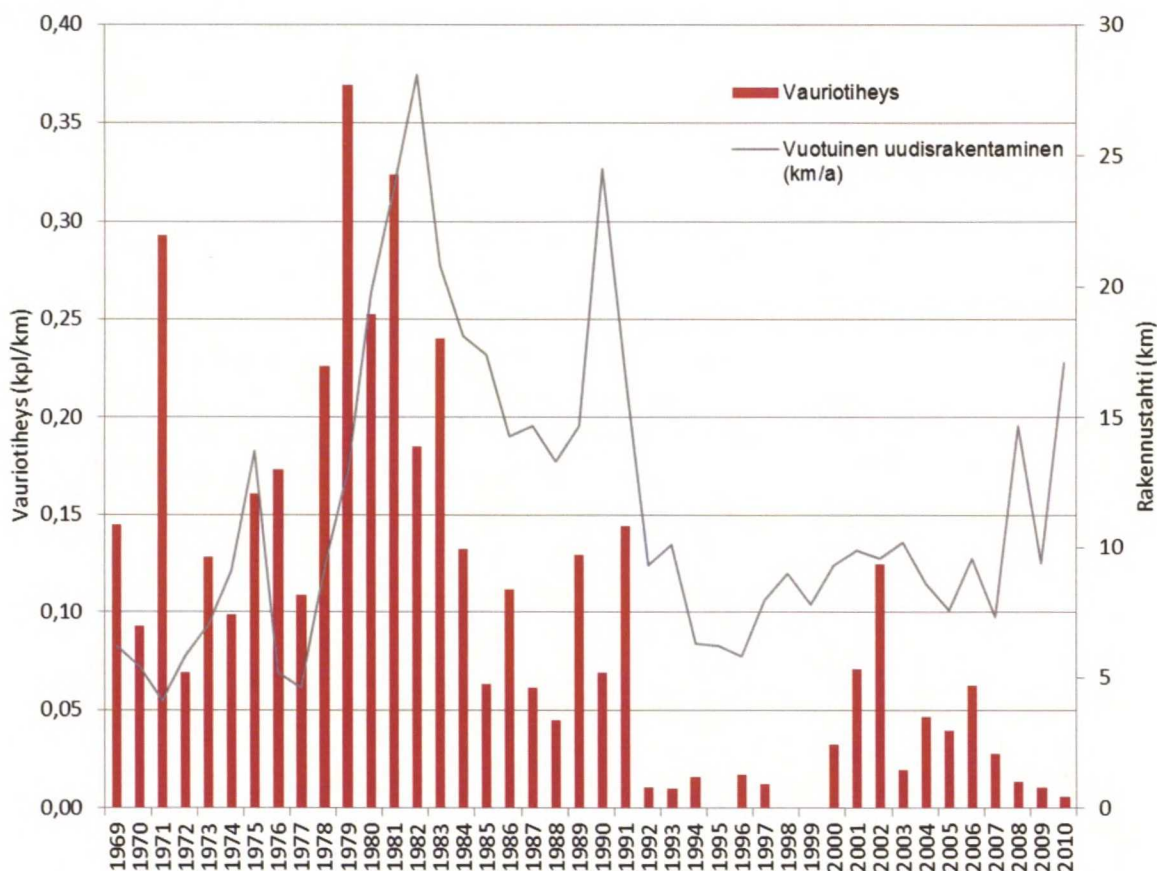
Yleensä ottaen Vantaan kaukolämpöverkon vikaantuvuus vaikuttaisi olevan pienin ja tasaisin kiinnivaahdotetuilla muovisuojakuorijohdoilla (2Mpuk). Parhaimmillaan 2Mpuk-johtojen vikaantuvuus on tilasto-otannan mukaan jäänyt alle 0,1kpl/km ja korkeimmillaankin ollut noin 0,15 kpl/km. Kaikkien johtojen yhteisvikaantuvuus noudattelee melko tarkoin kiinnivaahdotetun johdon vikaantuvuuskäyrän kulkua, mikä selittyy kiinnivaahdotettujen johtojen dominoivalla osuudella johtokannasta. Eniten oireilevan johtotyyppin nimeäminen kuvan perusteella on ongelmallista johtuen fiskarsin ja betonielementtikanavien vikaantuvuuksien heilahteluista kymmenen tilastovuoden aikana. Etenkin fiskarsin vikaantuvuus on sahanut voimakkaasti nollan ja yli 0,5 kpl/km välillä. Sahakuvion syntyä selittää osittain fiskarsin lyhyempi verkostopituus, jolloin jo muutamat vauriot vuoden aikana näkyvät kuvaajassa selkeämmin kuin muilla rakenteilla. Viime vuosina, huonosta maineestaan huolimatta, fiskarsin vikaantuvuus on tilastojen perusteella ollut jopa matalampi kuin betonielementtikanavilla.

Kaukolämpöjohtojen vauriotiheyksiin liittyvien syy-seuraus-suhteiden havaitsemiseksi ja verkon riskikohteiden ennustamiseksi tilastoaineistosta piirrettiin myös kuvaajat, joissa vikaantuvuutta tutkittiin rakennusvuoden, rakennustahdin sekä putkien iän ja dimension funktiona. Muista kaukolämpöjohtojen vikaantuvuuksiin mahdollisesti yhteydessä olevista tekijöistä liikenteen ja verkon painetasojen merkitystä vauriomääriin tutkittiin vauriotiheyksistä laaditun vaurioteemakartan avulla (kappale 5.3.3). Maaperäolosuhteiden ja johtojen vikaantuvuuden yhteyden tarkempi analysointi ei puolestaan ollut mahdollista johtokaivantojen maaperätietojen puuttumisen vuoksi. Monissa paikoin maaperä on kuitenkin yleisesti ottaen savimaata, mikä osaltaan ei tee johtojen ulkopuolisista ympäristöolosuhteista optimaalisia (Siitonen 2012).

Rakennusvuoden vaikutus vauriotiheyteen

Kuvassa 33 on esitetty Vantaan kaukolämpöverkon vauriotiheys rakennusvuoden funktiona ja lisäksi samaan kuvaan on myös piirretty vuosittain rakennetut johtopituudet. Vauriotiheydet eri rakennusvuosille kuvastavat kunakin vuonna rakennetuissa johdoissa ilmenneiden vaurioiden määrää suhteutettuna senvuotiseen rakennettuun johtopituuteen. Kuvaajassa ilmoitetut vauriotiheyksien arvot on saatu keskiarvona tilastotarkastelujakson 2001–2010 vuosille aluksi erikseen lasketuista vauriotiheyksien arvoista. (Esimerkiksi vuonna 1980 rakennetun johdon vauriotiheyden

määrittäminen on aloitettu läpikäymällä jokainen vuositalasto yksinään läpi poimimalla tilastosta ensin vuonna 1980 rakennettujen johtojen vauriot ja jakamalla saatu vauriomäärä tämän jälkeen vuonna 1980 rakennettujen johtojen pituudella. Lopputuloksena on saatu yhteensä 10 vauriotiheyttä, joista on laskettu keskiarvo kuvaajaa varten.)



Kuva 33 Kaukolämpöjohtojen vauriotiheyden yhteys vuotuisen uudisrakentamistahtiin.

Kuvan 33 perusteella vuotuisella rakennustahdilla ja johtojen vikaantuvuudella näyttäisi olevan ainakin osittain yhteys. Vauriotiheyden ja rakennustahdin korrelaatiota selittää rakennusaikainen kiire työmailla, jolloin rakentamisen laatu on kärsinyt, mikä jälkikäteen ilmenee keskimääräistä korkeampina vauriomäärinä. Esimerkiksi 1990-luvun taitteessa rakentamispikki ja johtojen vauriotiheyden kasvu osuvat melko hyvin yhteen. Toisaalta kuvaajasta on havaittavissa useitakin vuosia, joita korkea rakennustahti ei taas näyttäisi selittävän. Esimerkiksi vuoden 1971 johtojen vauriotiheys on hyvin korkea, mutta rakennustahti jopa hidastui kyseisenä vuotena lähivuosiin verrattuna. 1980-luvun taitteessa vikaantuvuuden kasvu kulkee puolestaan osittain rakennustahdin nousua edellä. 2010-luvun loppupuoliskolla rakennustahti on taas

kiristynyt vikaantuvuuden samanaikaisesti madaltuessa, mutta toisaalta vasta alle viiden vuoden ikäisissä johdoissa suuret vauriomäärät eivät olisi laisinkaan hyväksyttäviä.

Vaikka vauriotiheys ei vaikuttaisi täysin korreloivan vuotuisen rakennustahdin kanssa, niin syitä tiettyjen vuosien korkeisiin vauriomääriin voidaan silti hakea rakentamisesta ja rakentamisen ajankohtasidonnaisuudesta. Esimerkiksi 1980-luvun taitteen vikaantuvuuden huimaa nousua jo ennen rakentamisen vilkkainta ajanjaksoa pystytään selittämään siirtymisellä kiinnivaahdotettujen muovisuojakuorijohtojen laajempaan käyttöön. Kiinnivaahdotetun rakenteen käytön alkuaikoina rakennustyötä vaivasi tietotaidon puute siirryttäessä käyttämään osia, joita ei ollut aikaisemmin edes nähty. Uuden rakenteen asennukseen Vantaalla siirryttiin käyttämällä aluksi vanhaa kiintopistetekniikkaa (kuva 34), sillä kitkakiinnitykseen toimivuuteen ei vielä tuolloin uskottu. Kiintopisteiden käyttö johti siihen, että suojakuori piti rikkoa tartuntarautojen kiinnittämiseksi virtausputkiin, mikä synnytti verkkoon epäjatkuvuus- eli vuotoriskikohtia. Myöskään asianmukaista kaukolämpöjohtojen liitoskoulutusta ei tuolloin vielä työmiehille järjestetty. Työmenetelmien lisäksi myös työvälineissä esiintyi puutteita, mikä omalta osaltaan hankaloitti rakentamista. (Ojansuu 2012 ja Siitonen 2012)



Kuva 34 Esimerkki kiintopisteiden käytöstä kiinnivaahdotettujen johtojen rakentamisessa. Polyuretaanieristeestä ei ole enää paljoakaan jäljellä. Lähde: Vantaan Energia 2012

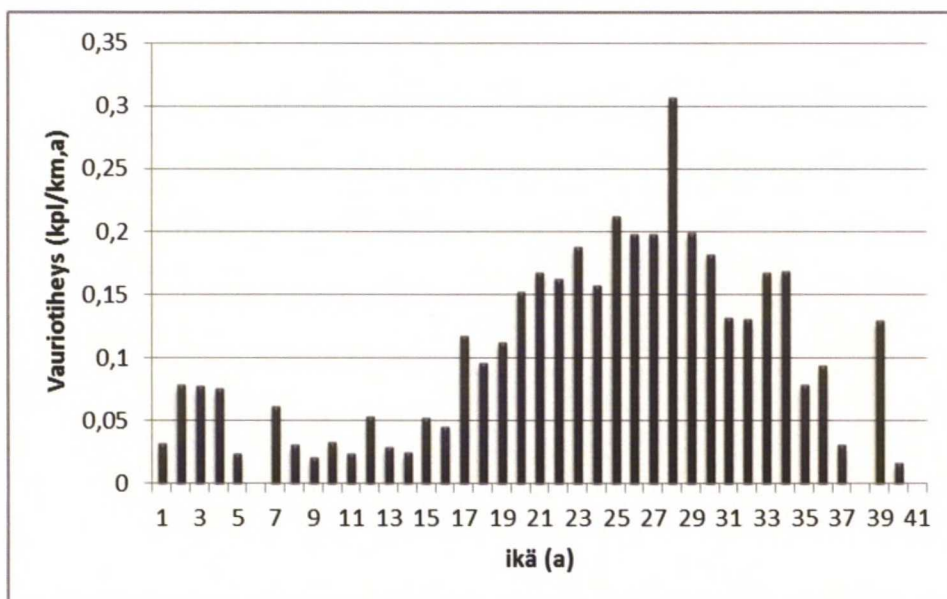
Tietotaidollisten puutteiden lisäksi johtojen vikaantuvuuksien ajankohtasidonnaisuuteen on löydettävissä yhteys myös ajoittain vaihdelleeseen ”tekemisen tyyliin”. Rakentamista on esimerkiksi ajoittain leimannut materiaalinuukuus, minkä seurauksena alun alkaen saavutetut säästöt ovat jälkeensä tulleet kalliiksi. Esimerkiksi pitkiä johto-osuuksia on saatettu aikoinaan jättää ilman sulkuventtiileiden asennusta, minkä vuoksi käyttökeskeytysalueiden rajaamisessa esiintyy välillä ongelmia. Toisaalta myös aika ajoin enemmän vaivannut resurssipula, kuten verkkomestareiden määrän rajaaminen Vantaan kokoisella alueella yhteen, on osaltaan supistanut eri kohteiden saaman huomion määrää, mikä jälkikäteen voi näkyä vauriotilastoissa piikkeinä. Nytemmin Vantaalla on panostettu resursseihin systeemimuutoksen kautta niin määrällisesti kuin laadullisestikin jättämällä esimerkiksi uudispuolirakentaminen kokonaan ammattitaitoisten urakoitsijoiden hoidettavaksi, jolloin oman kunnossapitoporukan on mahdollista keskittyä vaurioiden etsimiseen ja korjaamiseen. Materiaalivarmuutta on puolestaan viety eteenpäin siirtymällä käyttämään EHP-sertifikaatin saaneita

elementtejä ja valmisosia sekä hyväksymistodistuksen saaneita liitosratkaisuja. (Ojansuu 2012 ja Siitonen 2012)

Kaukolämpöjohtojen iän vaikutus vauriotiheyteen

Kuvassa 35 Vantaan kaukolämpöjohtojen vauriotiheyttä on tarkasteltu johtojen iän funktiona. Johtojen ikä korjaushetkellä on saatu korjausvuoden ja rakentamisvuoden erotuksena. Kuvaajassa ilmoitettu vauriotiheys on laskettu keskiarvona jokaiselle vauriotilastovuodelle (2001–2010) aluksi tilastovuosille erikseen suoritettun laskennan pohjalta. Yksittäisen tilastovuoden vauriotiheys on saatu laskemalla sinä vuonna tietynikäisissä johdoissa olevien vaurioiden määrä ja suhteuttamalla tämä tulos johtojen rakennusvuotena rakennettuihin johtopituuksiin. (Esimerkiksi vuoden 2003 vauriotilastosta 31-vuotiaiden johtojen vauriotiheys on saatu laskemalla vuonna 1972 rakennetuissa johdoissa olevien vaurioiden määrä ja jakamalla luku vuonna 1972 rakennetulla johtopituudella.)

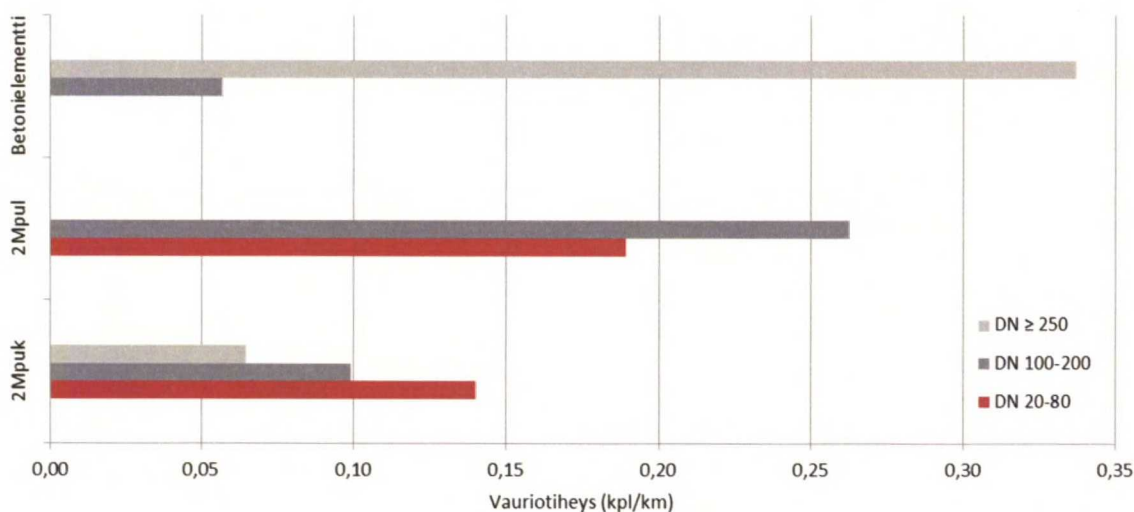
Tilastotarkastelun tuloksena piirretyn kuvaajan (kuva 35) perusteella kaukolämpöjohtojen vauriotiheys ei Vantaalla näyttäisi olevan pelkästään kasvava johtojen iän suhteen, vaan noin 30-vuotiaiden johtojen kohdalla vikaantuvuus kääntyy yleensä ottaen laskuun. Vikaantumisen kääntyminen laskuun on kuitenkin selitettävissä sillä, että vanhimmista kaukolämpöjohdoista kaikkein eniten vikaantuneet johto-osuudet on jo ehditty poistaa käytöstä. Havaittu ilmiö tukee myös käsitystä siitä, että huolellisin rakennustyön tuloksena ja hyvissä olosuhteissa kaukolämpöjohdot kestävät ikääntymisestä huolimatta normaalikäytössä moitteettomasti. Keskimäärin vikaantuneimmat, 20–30 vuotta vanhat, johdot osuvat puolestaan rakennetuiksi juuri ajanjaksolla, jolloin edellä jo todettiin erityisesti olleen ongelmia rakentamisen laadun kanssa.



Kuva 35 Vantaan kaukolämpöjohtojen vauriotiheyden yhteys johtojen ikään.

Putkidimension yhteys vikaantuvuuteen

Viimeisessä vauriostatista piirretyssä kuvaajassa (kuva 36) on tarkasteltu putkidimension yhteyttä vauriotiheyteen pääjohtotyyppittäin. Kuvaajassa ilmoitetut vikaantuvuudet on saatu keskiarvoina yksittäisille tilastovuosille (2001–2010) lasketuista vikaantuvuuksista. Yksittäisten vuosien vikaantuvuudet on laskettu jakamalla tarkasteluvuoden aikana sattuneiden vuotojen lukumäärä kussakin dimensio- ja johtoluokassa tähän ryhmään kuuluvien johtojen kokonaispituudella tarkasteluvuotena.



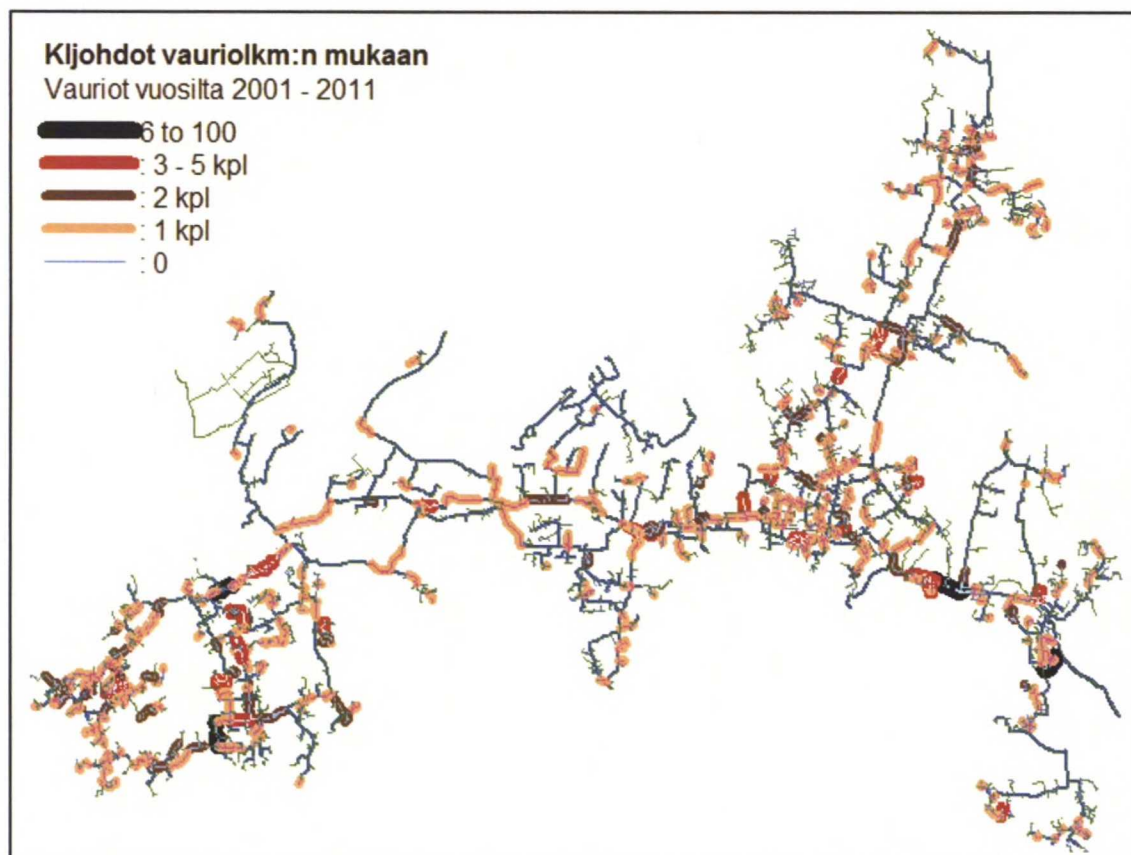
Kuva 36 Vauriotiheyden yhteys putkidimensioon, kun tarkastelussa on huomioitu pääjohtojohdorakenteet erikseen.

Kaukolämpöjohtojen päärakennetyypit huomioiden korkein vauriotiheys Vantaalla on suurimman kokoluokan betonielementtikanaavilla. Saman rakenteen kohdalta löytyvät myös pienimmän vikaantuvuuden johdot kokoluokassa DN 100–200. Kokoluokan DN 20–80 betonielementtikanaavien ja kokoluokan DN ≥ 250 fiskars-rakenteen vikaantuvuuspaikkien puuttuminen johtuu siitä, ettei johtoja esiinny kyseisissä kokoluokissa. Fiskars-johtojen vikaantuvuus on tämän tarkastelun mukaan varsin korkea sen molempien kokoluokan johdoissa. Kiinnivaahdotetut muovisuojakuorijohdot sen sijaan pärjäävät vertailussa hyvin. Niissä suhteellisesti vähiten vaurioita ilmenee lämmöntoimituksen kannalta kriittisimmissä, eniten lämpöä siirtävissä, suuren kokoluokan johdoissa.

5.3.3 Vikaantuvuuksien teemakartoitus

Vantaan kaukolämpöverkko on jaettu hyvin eripituisiin, kuitenkin alle kilometrin pituisiin, johto-osuuksiin, jotka on yksilöity piirustusnumeroiden avulla. Tilastoihin kerättyjen vuotoja koskevien paikkatietojen ansiosta vuodot pystyttiin yhdistämään tietyille johto-osuuksille, jolloin saatiin selville eniten vaurioituneet paikat. Kuvassa 37 Vantaan verkkokarttapohjalle on värjätty vaurioituneet johto-osuudet niissä olleiden vuotojen lukumäärien mukaisesti. Tilastotarkasteluajanjakson 2001–2010 vuototietojen lisäksi kartta on päivitetty vuoden 2011 aikana sattuneilla vuodoilla. Kartassa

vaaleanruskealla teemavärillä värjättyissä johdoissa on ollut tarkasteluajanjaksolla yksi vuoto, ruskealla värjättyissä kaksi, punaisella värjättyissä 3-5 ja mustissa kuusi tai enemmän.



Kuva 37 Kaukolämpöjohtojen vuotomäärien mukaan värjättyt johto-osuudet. Lähde: Vantaan Energia 2012

Kaukolämpöjohtojen vauriomäärätarkastelu paljastaa pahiten oireilevat johto-osuudet, joita joudutaan korjaamaan tiuhaan tahtiin. Vuototaajuudeltaan hälyttävimmässä, kuvassa 37 mustalla värjättyissä, kaukolämpöjohdoissa vuotoja on tarkasteluajanjakson aikana sattunut pahimmillaan jopa kymmenen, eli keskimäärin yksi vuosittain. Verkon käyttövarmuuden parantamiseksi sekä korjauskustannusten leikkaamiseksi erityisesti tämäntyyppiset, suuren vikataajuuden, johto-osuudet nousevatkin tärkeiksi perusparannuskohteiksi. Toisaalta pelkästään vikataajuuden perusteella ei kulloinkaan toteutettavista perusparannuskohteista voida päättää, vaan päätöksenteossa on lisäksi huomioitava esimerkiksi eri johto-osuuksien tärkeys verkon kokonaistoimivuuden kannalta. Kappaleessa 6.3 on tarkemmin pohdittu perusparannuskohteiden valintaan liittyviä kriteereitä sekä niiden keskinäistä arvottamista päätöksenteossa.

Huonokuntoisten johto-osuuksien tunnistamisen ja paikantamisen lisäksi kuvan 37 vauriomääräkartta soveltuu myös työkaluksi esimerkiksi ympäristötekijöiden, kuten liikenteen ja pinnanmuotojen, vikaantuvuusvaikutusten havaitsemisessa. Etenkin muuttuneilla ympäristöolosuhteilla pystytään usein selittämään varsinkin hieman vanhempien johto-osuuksien korkeita vikataajuuksia. Alun perin syrjempään ja muiltakin osin otollisiin olosuhteisiin rakennettujen kaukolämpökanavien hiljaiselo on voinut kaupungin kasvun sekä inframuutosten myötä muuttua aiempaa selkeästi kuormittavammaksi, mihin kaukolämpöjohdot reagoivat vaurioiden lisääntymisenä. Vantaallakin on havaittavissa esimerkiksi vauriotiheyskarttaa ja nykyisiä tielinjauksia vertaamalla, että monet vanhat ja usein korjattavat betonielementtikanavat sijaitsevat vilkkaasti liikennöityjen teiden alla. Syy suuriin vauriomääriin on tällöin ollut liikenteen aiheuttama tärinä, joka on aiheuttanut kanavien saumakohtien liikahtamisen pois paikaltaan, jolloin ulkopuolinen vesi on päässyt sisään rakenteisiin. Tulevaisuudessa tällaisia ympäristöolosuhteista koituvia yksittäisten johto-osuuksien aiheuttamia vikaantumispiikkejä on odotettavissa ilmaantuvan lisää, mikäli kaupungin laajentumisessa ja infrarakentamisessa niiden aiheuttamaa vaikutusta kaukolämpölinjojen olosuhteisiin ei oteta huomioon. Toisin kuin aikaisemmin, nyt muutoksien myötä otettava riski on kuitenkin tietoinen. (Ojansuu 2012 & Siitonen 2012)

Ympäristötekijöiden lisäksi vauriomääräkarttaa verrattiin myös verkon painekarttaan vauriotiheyden paineriippuvuuden tarkastelemiseksi. Vauriotiheyden korrelaatiota verkon painetasojen kanssa ei kuitenkaan ollut juuri havaittavissa verkon kovapaineisimmissakaan kohdissa pumppaamoiden jälkeen. Niissäkin verkon kohdissa, joissa sekä paine että vikataajuuksivat olivat molemmat keskimääräistä korkeampia, oli vuotojen alullepanijaksi kaikissa tapauksissa kirjattu kaukolämpöjohtoja ympäröivän ympäristön tekijä, tyypillisesti elementtisaumoista sisään päässyt ulkopuolinen vesi. Vantaan kaukolämpöverkon suunnittelupaineen ollessa 16 bar:ia virtausputkien tulisikin lähtökohtaisesti kestää normaalissa käytössä ongelmitta. Mikäli putki on kuitenkin jo valmiiksi syöpynyt ja paksuudeltaan enää hiekkapaperin ohutta, niin kovempi paine on tällöin toki lisärasite, muttei silti vuodon lähtösy. (Siitonen 2012)

Huolimatta siitä, ettei verkon painetasoilla vaikuttaisi olevan merkitystä johtojen vikaantuvuuteen, on paineella kuitenkin voimakkaiden paineenvaihteluiden kautta monesti olennainen vaikutus vuotojen syntymekanismiin. Tämä on Vantaan tilastotietoja tutkimalla havaittavissa esimerkiksi lämmityskauden alussa syksyisin, jolloin lämmöntuotantolaitoksia aletaan käynnistellä. Tästä aiheutuva paineen sekä lämpötilan nousu verkossa ilmenevät vikapiikkinä vauriotilastoissa. Liian nopeista venttiilien sulkemisista aiheutuvat verkon paineiskut ovat vielä oma lukunsa satunnaisten vikapiikkien synnyttäjinä, sillä ne helposti repivät auki jo alkavat vuotokohdat aiheuttaen paljon tuhoa sekä mittavia käyttökeskeytyksiä (Siitonen 2012). Tällaisten vuosittain sykleittäin toistuvien tai satunnaisten vikapiikkien syiden huomioiminen ei kuitenkaan niinkään selitä kiinnostuksen kohteena olevaa pidemmän aikavälin syiden ja ilmiöiden löytämistä.

6 Vantaan kaukolämpöverkon perusparantaminen

Kaukolämpöverkon ikääntyessä, tästä johtuvan vikaantuvuuden kasvaessa sekä perusparannustarpeen lisääntyessä perusparantamisen suunnitelmallisuuden ja päätöksentekoa ohjaavien periaatteiden määrittämisen merkitykset korostuvat aikaisempaan nähden. Vaikka nykytilanteessa perusparantamisen volyymin kasvattamiselle kohdistuukin painetta, pakottaa etenkin taloudellisten resurssien rajallisuus tekemään valintoja toteutettavista kohteista sekä niiden aikatauluttamisesta.

Tässä luvussa on aluksi tarkasteltu Vantaan kaukolämpöverkon perusparantamisen nykytilaa ja pohdittu sen tarvetta tulevaisuutta ajatellen. Tämän jälkeen on mietitty perusparantamiselle asetettavia tavoitteita ja tarkasteltu, mitä tavoitteiden saavuttaminen käytännössä edellyttäisi esimerkiksi vuosittaisen budjetin ja perusparannusvolyymin kannalta. Yksittäisten perusparannuskohteiden aikatauluttamiseksi ja keskinäisen perusparannusjärjestyksen määrittämiseksi verkosta on laadittu riskikartoitus, jonka tarkoituksena on toimia päätöksenteon aputyökaluna. Lopuksi on tarkasteltu perusparantamisen taloudellista kannattavuutta kahden esimerkkilaskelman avulla.

6.1 Perusparantamisen nykytila ja tarve tulevaisuudessa

Vantaalla, kuten muuallakin Suomessa yleisesti (Energiateollisuus 2008b, s. 1), on panostus kaukolämpöverkon uudistavaan perusparantamiseen ollut tähän asti varsin vähäistä muun rakennustoiminnan rinnalla. Perusparannuskohteiden ennalta suunnittelun ja perusparantamisen budjetoinnin voidaan sanoa Vantaalla tulleen varsinaisesti mukaan toimintaan oikeastaan vasta viime aikoina. Metrimääräisesti verkkoa on uudistavan perusparantamisen mukaisesti uusittu viime vuosina joitakin satoja metrejä (keskimääräisesti noin 500 metrin verran) riippuen keskeisesti muun rakennustoiminnan viemistä resursseista sekä suoritettujen perusparannuskohteiden kuormittavuudesta niin kustannuksellisesti kuin ajallisestikin. (Siitonen 2012)

Perusparannuskohteiden valintaa ohjaavia tekijöitä ei ole tähän mennessä varsinaisesti määritelty eikä johto-osuuksien tarkkoja tilastollisia vauriomäärätietoja ole mitattu ja

hyödynnetty. Kohteiden valinta on pitemminkin perustunut muistinvaraiseen käsitykseen johtojen vikaantuvuuksista, ja ne on päätetty uusia, kun vauriomäärien kipukynnyksen on jollain tavalla koettu ylittyneen. Perusparantamisen taloudellista kannattavuutta johto-osuuksien uusimiseen liittyvien säästöpotentiaalien, kuten lämpöhäviöiden, kautta ei myöskään näin ollen ole aikaisemmin tarkasteltu.

Uudistavan perusparantamisen lisäksi Vantaan kaukolämpöverkko on toisaalta perusparantunut myös kaukolämpötoiminnan ulkopuolisista syistä johtuvien linjojen siirtojen vuoksi. Siirtojen myötä johtokanta on toki uudistunut, mutta näitä kohteita ei vielä muuten olisi luultavasti toteutettu. Aiempien perusparannusvolyyymien arvioimisessa nämä kohteet on kuitenkin myös syytä huomioda, sillä ne vievät osansa perusparantamiseen varatusta budjetista. Linjojen siirtovolyymit ovat niin ikään vaihdelleet huomattavasti vuosittain joistakin sadoista metreistä jopa pariin kilometriin. Varsinaisen perusparantamisen lisäksi verkon teknisiä ominaisuuksia on pyritty kehittämään myös lisäämällä jälkikäteen esimerkiksi ylimääräisiä sulkuventtiileitä käyttökeskeytysten rajaumahdollisuuksien parantamiseksi.

Nykytason uudistavan perusparantamisen sekä linjojen siirtojen mukaisten perusparannusvolyyymien avulla voidaan teoreettisesti määrittää verkoston kiertonopeus eli se aika, jonka kuluessa tämänhetkinen verkko (vuoden 2011 lopulla noin 476 km) olisi kertaalleen perusparannettu. Jos laskennallisena keskimääräisenä metrimääräisenä volyymina käytettäisiin esimerkiksi 1,2 kilometriä (vastaten noin 0,25 % verkon pituudesta), tarkoittaisi tämä noin 400 vuoden kiertonopeutta ja 1,5 kilometrin (0,32 % verkostopituudesta) metrivolyyymikin vielä noin 320 vuoden kiertonopeutta. Jotta koko verkon uusimisella saavutettaisiin esimerkiksi 75 vuoden kiertonopeus, edellyttäisi tämä noin 6,3 (noin 1,3 % verkostopituudesta) kilometrin vuotuista perusparannusvolyyymia.

Tämäntyyppinen verkon uudistumista mittaava lähestymistapa ja viimevuotisilla perusparannusvolyyymeilla määritetty hyvin pitkä verkon kiertonopeus eivät kuitenkaan käytännössä kerro koko totuutta perusparantamisen nykyisestä tasosta tai sen riittävydestä. Vuosittain saavutettavat metrimäärät eivät saisi muodostua perusparantamista ohjaavaksi ja tavoitteelliseksi itseisarvoksi, sillä samalla euromääräisellä budjetilla pystytään yleensä ottaen perusparantamaan eri määrät

erikokoista linjaa. Näin ollen metrimääräistä volyymia saadaan kyllä lisättyä valikoimalla uusittaviksi kohteiksi paljon pieniä kaukolämpöjohtoja, mutta tämä strategia ei kuitenkaan pidemmän päälle ole paras verkon käyttövarmuuden ja taloudellisuuden parantamiseksi. Toisaalta Vantaan kaukolämpöverkon ollessa laajuudeltaan niin suuri, ei liene realistista lähteä liikkeelle ajatuksesta, että koko verkko tultaisiin uusimaan metri metriltä määritellyn ajanjakson kuluessa. Sen sijaan on pyrittävä tekemään strateginen linjaus siitä, mitä johtoja systemaattisen perusparantamisen tulisi koskea. Tällöin pystyttäisiin myös konkreettisesti edes jollain tasolla estimoimaan toteutukseen tarvittavaa budjettia, tavoitteellisia vuosivolyymeja sekä määrittelemään perusparannuskohteiden valintaa ohjaavia tekijöitä.

6.2 Perusparantamisen tavoitteet ja niiden saavuttaminen

Perusparantamisen lähtökohtaisena tarkoituksena ja ohjaavana tekijänä voidaan pitää verkon luotettavuuden ja käyttövarmuuden parantamista. Näin laaja-alaisesti määritellyn tavoitteen asettaminen ei kuitenkaan auta rajaamaan sitä johtokantaa, jota verkon systemaattisen perusparantamisen tulisi koskea, sillä kaukolämpöjohtojen vuodot aiheuttavat aina jonkinasteisen poikkeustilan, jolloin systemaattisen perusparantamisen tulisi koskea koko verkkoa. Kaukolämpöverkon käyttövarmuuden samoin kuin myös taloudellisten kustannusten ja kaukolämmön imagon näkökulmasta tulevaisuuden suurimpana uhkakuvana voidaan kuitenkin pitää sitä, että jatkossa vastaan tulee yhä enemmän isoja ja tuotannon seisauttavia häiriötilanteita, joiden hintalaput voivat pyöriä jopa sadoissa tuhansissa euroissa (Ojansuu 2012 & Siitonen 2012). Perusparantamisen ensisijaiseksi ja lähtökohtaiseksi tavoitteeksi voitaisiinkin asettaa, ettei tämäntyypisiä suurhäiriötilanteita pääsisi syntymään. Tällöin verkon systemaattinen perusparantaminen kyetään rajata koskemaan erikseen määriteltyä kriittistä johtokantaa, mikä mahdollistaa resurssien, niin taloudellisten kuin työvoimankin, tarkoituksenmukaisen kohdistamisen.

Yksittäiseksi kriittiseksi luokiteltavaksi kohdejohtoryhmäksi voidaan tunnistaa verkon betonielementtikanaavat, jotka ovat verkossa jakelu- ja siirtojohtojen asemassa. Niiden tapauksessa virtausputket ovat monesti vuotojen seurauksena uusimiskunnossa pidemmältä matkalta vuotovesien päästessä kulkeutumaan pitkin kanavarakenteita.

Betonielementtikanavien virtausputkien vuotoihin liittyy lisäksi myös riski vuotokohtien repeytymisestä, jotka voivat aiheuttaa painetasen romahtamisen verkossa, minkä seurauksena tuotanto joudutaan ajamaan alas. Betonielementtikanavien perusteltavissa olevan systemaattisen perusparannustarpeen lisäksi verkosta voidaan tunnistaa myös joukko kiinnivaahdotettuja kaukolämpöjohtoja, jotka on niiden lämmöntoimituskriittisyyden vuoksi syytä sisällyttää systemaattiseen perusparannusohjelmaan. Näitä johtoja on tarkastelu ja kartoitettu tarkemmin seuraavassa kappaleessa 6.3 verkon riskikartoitusosiossa. Kokonaisuutenaan kiinnivaahdotettuihin johtoihin ei kuitenkaan liity samanlaista systemaattisen vaihtamisen tarvetta kuin betonielementtikanaviin: Kiinnivaahdotetuissa johdoissa putkivuodot ovat yleensäkin vaikutusalueeltaan paikallisia, eikä niiden korjauksiin kytkeydy samankaltaista riittämättömyyden riskiä kuin betonielementtikanavissa, ja tehtyjä korjauksia voidaan pitää luotettavina. Kiinnivaahdotettujen johtojen vuotojen synty- ja kehittymismekanismi on myöskin erilainen, eikä niissä esiinny betonielementtikanavien virtausputkiin yhdistettävissä olevaa repeytymisvaaraa (kts. tarkemmin kappale 6.3).

Systemaattisen perusparantamisen kohdejohtokannan määrittelyn jälkeen esille nousee kysymys siitä, mikä vuosittaisen budjetin ja tavoiteltavan perusparannusvolyymin tulisi olla, jotta päätavoite, eli verkon käyttövarmuuden turvaaminen, saavutettaisiin. Yksi keino lähteä hakemaan tähän vastausta on esimerkiksi ensin arvioida, kuinka paljon koko johtomassan kerralla perusparantaminen tulisi maksamaan ja jakaa saatu summa vuosille tavoitteellisen aikataulun mukaan. Helpotetaan budjetointitarkastelua kuitenkin hieman rajaamalla tarkastelu koskemaan vain betonielementtikanavia määräämättä kuitenkaan ehdottoman tarkasti, minkä ajan kuluessa rakenteen viimeisetkin johtometrit on saatu poistettua. Systemaattinen perusparantaminen tulee tulevaisuudessa koskemaan nimenomaisesti betonielementtikanavia, joiden osuus kohdejohtomassasta on hallitseva. Hyväkuntoisia johtoja ei ole tarkoituksenmukaista vaihtaa ensitilassa, ja vaikka betonielementtikanavat linjattaisiinkin niiden vikaantuvuutta ennakoiden uusittaviksi systemaattisesti, jättää rakenteen avoimeksi jätetty poistumisaikataulu joustoa kriittisiksi luokiteltavien kiinnivaahdotettuja johtojen uusimiseen tarpeen tullen.

Betonielementtikanavia on Vantaan kaukolämpöverkossa tällä hetkellä noin 48 km. Tämä rajattukin johtoryhmä on vielä hyvin moninainen koostuen erikokoisista ja perusparantamisen kannalta haastavuudeltaan eritasoisista johdoista, jolloin toteutuvissa perusparannuskustannuksissa voidaan olettaa olevan paljon hajontaa. Haluttaessa kuitenkin määritellä tavoitteellista budjettia systemaattiselle perusparantamiselle estimoidaan johtojen uusimisesta syntyviä keskimääräisiä yksikkökustannuksia käyttäen pohjana ET:n kyselytulosten perusteella saatuja keskimääräisiä uudisrakentamiskustannuksia ja ottamalla perusparantamisen kustannuslisä huomioon kustannuskertoimen avulla. Taulukon 1 perusteella verkon betonielementtikanavia vastaavan kokoluokan (\geq DN 200) kaukolämpöjohtojen keskimääräisiksi uudisrakennuskustannuksiksi saadaan 825 €/m. Betonielementtikanavien ollessa yleensä ottaen melko työläitä ja hintavia perusparantaa lisätään uudisrakennuskustannuksiin vielä 30 prosentin kustannuslisäoletus, jolloin arvioksi perusparantamisen keskimääräisistä yksikkökustannuksista saadaan 1 073 €/m. Tätä lukuarvoa käyttäen koko betonikanavakannan uusiminen tulisi tällä hetkellä maksamaan noin 51 480 000 €.

Alla olevassa taulukossa 2 on tarkasteltu, kuinka suuri tulisi systemaattiseen perusparantamiseen varatun vuosibudjetin nykyhinnoissa olla riippuen johtokannan valitusta uudistumistahdista. Kohdejohtokannan kiertonopeuden taulukoinnissa on huomioitu, että nuorimmat betonielementtikanavat on rakennettu 1980-luvun loppupuolella, jolloin ne ovat tällä hetkellä iältään noin 25-vuotiaita. Vuosibudjetin ollessa tiedossa voidaan tästä laskea, kuinka monta metriä summalla vuosittain pystyttäisiin keskimäärin perusparantamaan.

Taulukko 2 Systemaattiseen perusparantamiseen varatun vuosibudjetin määrittäminen verkon valitun uudistumistahdin perusteella.

Uusimisurakan kesto nykyhetkestä (a)	Kiertonopeus (a) = Urakan kesto + 25 a	Vuotuinen budjetti (€)	Budjetin mahdollistama perusparannusvolyymi (m/a)
10	35	5 148 000	4 800
15	40	3 432 000	3 200
20	45	2 574 000	2 400
25	50	2 059 200	1 920
30	55	1 716 000	1 600
35	60	1 470 857	1 371
40	65	1 287 000	1 200
45	70	1 144 000	1 067
50	75	1 029 600	960
55	80	936 000	873

Riittävän vuosibudjetin suuruus riippuu siitä, mitä arvoa käytetään verkon tavoitteellisena kiertonopeutena. Kaukolämpöjohtojen odotettavissa olevasta käyttöiästä voidaan kuitenkin laatia vain ennusteita: Osa voi nähdä kaukolämpöjohdot yhtä ikuisina kuin Rooman akveduktit, mutta toisaalta suunnittelussa johtojen edellytetään tällä hetkellä kestävän pisimmillään käytössä 50 vuotta (Koskelainen et al. 2006, s. 137), osan tullessa todellisuudessa käyttöikänsä loppuun tätäkin huomattavasti aiemmin. Jos kiertonopeutena käytettäisiin esimerkiksi 75 vuotta, tulisi systemaattiseen perusparantamiseen varatun vuosibudjetin olla noin 1,03 miljoonaa euroa, jolla vuosittain pystyttäisiin keskimäärin perusparantamaan arviolta noin 900–1000 metriä kriittisiksi luokiteltavia johtoja. 50 vuoden kiertonopeus edellyttäisi jo noin 2 miljoonan vuosibudjettia ja lähes 2 kilometrin keskimääräistä vuotuista perusparannusvolyymia.

Kriittisyysluokitteluun perustuvan systemaattisen perusparantamisen lisäksi eteen voi tulla myös tilanteita, joissa perusparannusohjelmaan on syytä sisällyttää myös muita perusparannuskohteita tarpeen mukaan. Tällaisiksi kohteiksi voidaan luokitella esimerkiksi kiinnivaahdotetut johto-osuudet, joiden uusiminen korjauskelvottomuudesta tai vauriomäärien kipukynnyksen ylittymisestä johtuen tulee aiheelliseksi. Jälkimmäisen tekijän kohdalla oletuksena pidetään tällöin, ettei käyttövarmuutta ole saavutettavissa pelkästään paikallisella korjauksella, mihin syynä voi esimerkiksi olla koko johtolinjaa koskettavaksi tunnistettava huono rakennustekninen laatu.

Toinen esimerkkitalanne, jossa kriittisyysluokittelun ulkopuolisten kaukolämpöjohtojen, omalla tasollaan jopa systemaattisen, perusparantamisen voidaan katsoa olevan perusteltua, voi tulla vastaan fiskars-rakenteen yhteydessä. Näissä tapauksissa saatetaan tyypillisesti olla uusimassa korkean vauriotiheyden vuoksi esimerkiksi fiskars-rakenteista jakelujohtoa, josta lähtee fiskars-rakenteisia talohaaroja. Tällöin voidaan katsoa järkeväksi uusia samalla myös talohaarat, jotta verkkoon ei jää yksittäisiä pieniä pätkiä erillistä rakennetta ja turhia riskikohtia. Nykytilanteessa Vantaalta löytyy useita tämäntyyppisiä verkkoon jätettyjä rakenteellisia epäjatkuvuuskohtia. Erityisen tunnistetun vaurioriskin muodostavat fiskars-rakenteiset läpiviennit, jotka on jätetty vaihtamatta liittämällä fiskars-johto kiinnivaahdotettuun rakenteeseen niin kutsutulla housukappaleella. Jatkoa ajatellen tämäntyyppisiä kohtia ei verkkoon tulla enää jättämään, ja rakennustöiden yhteydessä eteen tulevat epäjatkuvuuskohdat ollaan niin ikään linjaamassa poistettaviksi. (Siitonen 2012)

Edellä mainitunlaisissa, uudistavan perusparantamisen piiriin luettavien, johtojen uusimistapauksissa perusparantamiseen varatun budjetin riittävyys tulisi aina tarkistaa vielä erikseen, jotta verkon systemaattisen perusparantamisen tavoite ei vaarannu. Myöskin linjojen siirrot siltä osin, kun ne eivät vastaa systemaattisen perusparantamisen kategoriointia, tulisi budjetoinnissa mitoittaa erikseen. Toteutuneiden rakennuskustannusten mittaukseen ja tilastointiin voidaan katsoa liittyvän kehittämistarvetta, jotta jatkossa perusparannuskustannusten arviointi sekä kehityksen seuraaminen olisi nykyistä luotettavampaa ja riittävän budjetin päivittäminen helpompaa.

6.3 Kaukolämpöverkon riskikartoitus

Edellisessä kappaleessa betonielementtikanavien todettiin varsin hyvin kuvaavan sitä johtomassaa, johon systemaattiseen perusparantamiseen mitoitettavien resurssien tulisi riittää ja tämän perusteella arvioitiin vuotuista budjettitarvetta sekä tavoitteellisia perusparannusvolyymeja. Systemaattisen perusparantamisen suunnittelu edellyttää toisaalta myös, että eri kohteet voidaan asettaa perusparannusohjelmassa keskinäiseen järjestykseen, minkä vuoksi tässä kappaleessa on määritelty kriteereitä, joiden avulla perusparannusjärjestys kyettäisiin osoittamaan.

Verkon käyttövarmuuden turvaamisen tähtäävän ajattelun lisäksi vaa'assa painavat etenkin myös turvallisuusnäkökohdat, jotka on niin ikään huomioitava perusparannussuunnittelussa. Sekä käyttövarmuus- että turvallisuusnäkökohdat huomioiden Vantaan kaukolämpöverkolle laadittiin riskikartoitus (kuva 38) perusparantamisen kannalta eri kulmista kriittisten johto-osuuksien nimeämiseksi. Riskikartoitusta varten valittiin kolme seuraavaa johtokategoriaa:

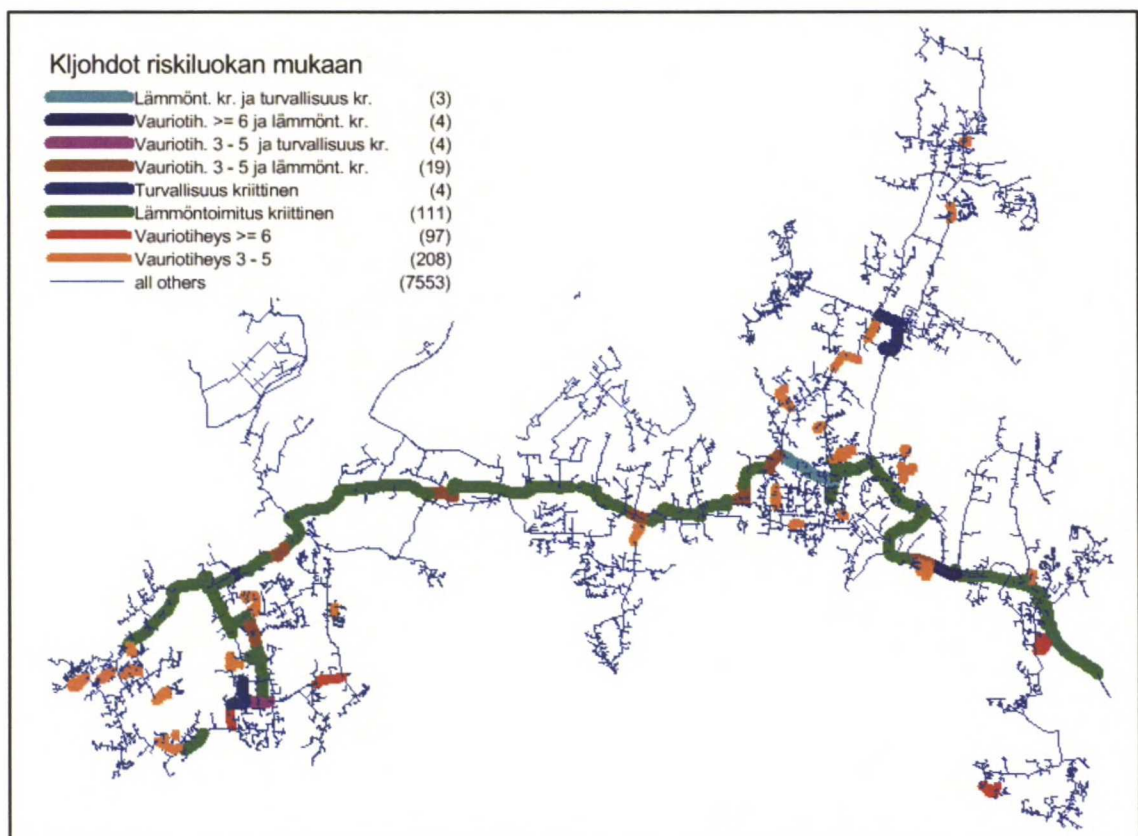
- usein vaurioituneet johto-osuudet,
- lämmöntoimituksen kannalta kriittiset johdot sekä
- turvallisuuden kannalta kriittiset johdot.

Usein vaurioituneiden johto-osuuksien ryhmään kategorioitiin ne johto-osuudet, joissa tilastoitujen vuotojen lukumäärä oli ollut neljä tai enemmän. Ryhmä jaettiin vielä lisäksi vuotojen määrän perusteella sisäisesti kahteen alaluokkaan, joista ensimmäisessä vuotojen määrä rajattiin 3-5 kappaleeseen ja toisessa alarajaksi asetettiin 6 kappaletta.

Lämmöntoimituskriittisillä johdoilla viitataan tässä yhteydessä tarkemmin ilmaistuna yhteistuotantolämmön siirtämisen ja tuotannon optimoinnin kannalta kriittisiin johtoihin. Käytännössä aina, kun verkolla sattuu häiriötilanne, aiheutuu siitä aina enempi vähempi poikkeusjärjestelyjä, mutta niiden problemaattisuudessa ja niistä koituvissa kustannuksissa on kuitenkin suuria eroja. Suurimpienkaan siirtojohtojen vaurioituminen ei teoriassa lamauta lämmöntoimitusta, sillä yhteistuotantolämpö pystytään aina vaihtoehtoisesti korvaamaan lämpökeskustuotannolla. Lähtökohtaisesti lämpö halutaan kuitenkin tuottaa yhteistuotannolla sen ollessa halvempaa, minkä lisäksi häiriötilanteiden ilmaantuessa lämpökeskusten käynnistämiseen liittyy viivettä, jonka aikana asiakkaat joutuvat olemaan ilman lämpöä. Lämmöntoimituksen kannalta kriittisiksi luokiteltuihin johtoihin eivät kuitenkaan automaattisesti kuulu kaikki suuren kokoluokan kaukolämpöjohdot, vaan ryhmään kuulumisen kriteerinä pidettiin, ettei linjan kapasiteettia pystytä myöskään korvaamaan vaihtoehtoisella reitillä.

Viimeiseen, turvallisuuden kannalta kriittisten johtojen, luokkaan poimittiin vaurioituessaan ihmisten terveydellä riskin aiheuttavat johto-osuudet. Tähän kategoriaan luokitellut johdot ovat isoja betonielementtikanavaisia runkolinjoja, jotka kulkevat alueilla, joissa liikkuu paljon ihmisiä tai autoja. Turvallisuusriskin ajateltiin liittyvän

nimenomaan sentyyppisiin betonielementtikanaviin, joista vuotovedet eivät mahdu pakenemaan muualle kanaviin, jolloin kuuma kaukolämpövesi nousee kaduille. Betonielementtikanaviin liittyy myös riski virtausputken äkillisestä repeämisestä, jolloin kuuma vesi voi suihkuta reiästä ympäristöön monen bar:in paineessa. Jos vettä tulee runsaasti, se voi myös ikään kuin syödä maan asfaltin alta, jolloin maanpinta muuttuu kantavuudeltaan kuin heikoksi jääksi. Kiinnivaahdotettuihin johtojen virtausputkiin ei liity samanlaista repeämisen riskiä, sillä sen muovikuori toimii osittaisena tukena. Lisäksi polyuretaanieristeinen vuotokohta pitemminkin ”muhii” itsekseen kuitenkin repeämättä hallitsemattomasti. Turvallisuusluokittelussa ei huomioitu eri asiakastyypin, kuten sairaaloiden, lämmöntoimitukselliseen varmuuteen liittyviä näkökohtia, koska Vantaalla ei ole käytössä minkäänlaista kaukolämpöasiakkaiden priorisointiluokittelua. (Siitonen 2012 & Ojansuu 2012)



Kuva 38 Vantaan kaukolämpöverkon riskikartoitus. Lähde: Vantaan Energia 2012

Riskikartassa (kuva 38) oranssilla ja punaisella värjättyt johdot kuvastavat korkean vaurioitihäyden vuoksi kriittisiä johto-osuuksia, vihreällä värjättyt lämmöntoimituksen ja sinisellä värjättyt turvallisuuden kannalta kriittisiä johto-osuuksia. Johto-osuuksien

värjäytyminen pelkästään sinisellä tai vihreällä teemavärillä ei tee niistä vielä suoraan perusparannettavia kohteita, sillä hyväkuntoisia johto-osuuksia ei ole syytä uusia, vaikka ne olisivat iäkkäitäkin. Sen sijaan näiden kriteerien täyttävien johto-osuuksien muuttuessa myös vikaantuvuuden vuoksi kriittisiksi nousevat ne perusparannettavien kohteiden kärkipäähän. Näiden kohteiden huomaamiseksi kartassa on otettu käyttöön aputeemavärejä, jotka kertovat kriteerien yhdistymisestä. Esimerkiksi tummansinisellä värjäytyneissä johdoissa on vuotoja ollut jo kuusi tai enemmän, minkä lisäksi ne on luokiteltu lämmöntoimituksen kannalta kriittisiksi, jolloin tällaisten johto-osuuksien ensi tilassa uusiminen on hyvin perusteltua. Turvallisuuden kannalta kriittisten johtojen osalta pelkän vaurioitiheyden kehittymisen seuraamisen sijaan tulisi niiden kuntoa pitää silmällä jo ennakoivasti keskimääräistä tarkemmin todellisten vaaratilanteiden ehkäisemiseksi. Osa kartassa vihreällä värjäytyistä kaukolämpöjohdoista on aivan uusia, eikä niihin välttämättä tule kohdistumaan perusparannustarvetta vielä pitkiin aikoihin.

Verkon riskikartoituksessa erikseen nimettyjen lämmöntoimitus- ja turvallisuuskriittisten kaukolämpöjohtojen ulkopuolelle jäävien betonielementtikanaavien perusparannusajankohtaa ja keskinäistä järjestystä ohjaavana tekijänä voidaan hyödyntää vauriomäärämittausta yksinään. Toisaalta myös betonielementtikanaavien kohdalla voi käytännössä esiintyä tarvetta muidenkin tekijöiden, kuten niiden siirtämän lämpötehon, arvottamiseen, jotta uusimistarkeys saadaan määriteltä. Systemaattisten perusparannuskohteiden määrittelyssä ja riskikartoittamisessa ei muutenkaan ole otettu yksityiskohtaisemmin kantaa siihen, missä suhteessa johtojen lämmöntoimitus- ja turvallisuuskriittisyyttä sekä vaurioituneisuutta tulisi painottaa toteutettavista kohteista päätettäessä. Vauriomääräkartta ja verkon riskikartoitus voivat toimia perusparannussuunnittelua helpottavina työkaluina, mutta päätösmuuttujien, eli johtojen vaurioitiheys-, lämmöntoimitus- ja turvallisuuskriittisyyksien, merkityssuhteiden arvottaminen jää lopulta strategiseksi kysymykseksi, johon päätöksentekovastuussa olevien on vaihtoehtotilanteissa itse otettava kantaa.

Toinen lähestymistapa perusparannuskohteiden ja niiden uusimisjärjestyksen osoittamiseksi olisi voinut olla esimerkiksi erillisen riskimatriisin muodostaminen. Riskimatriisilla olisi ennakoivasti voitu yrittää ennustaa johtojen perusparannustarvetta

pisteyttämällä niitä vikaantuvuudelle altistavien tekijöiden perusteella. Tämän tyyppisen lähestymistavan ja vuotoihin liittyvien alkusyiden huomioimisen ei kuitenkaan koettu antavan varsinaista lisäarvoa perusparannuskohteiden tunnistamiseksi. Sen sijaan johto-osuuksien vikataajuuden yksistäänkin todettiin kuvaavan perusparannustarvetta kaikista yksiselitteisimmin ja luotettavimmin. Pisteytysjärjestelmään olisi lisäksi liittynyt ongelma eri vikaantuvuustekijöiden painottamisesta, sillä tietoa siitä, kuinka oleellisesti ne lopulta yksittäistapauksissa vaikuttavat vuotojen syntyyn, ei ole. Johtojen keskinäinen tärkeysjärjestys olisi ollut myös vaikea huomioida, sillä esimerkiksi johdon pelkkä DN-koko ei suoraan kerro sen asemasta tai merkityksestä verkkokokonaisuuden kannalta. Vikaantuvuuksiin liittyvien syy-seuraus-suhteiden tiedostamista voidaan kuitenkin muuten pyrkiä käyttämään hyödyksi esimerkiksi verkon kunnossapitopuolella tämän edesauttaessa kiinnittämään huomiota erityisesti niihin johto-osuuksiin, joihin liittyy keskimääräistä suurempi vaurioitumisen riski.

6.4 Perusparantamisen kustannustarkastelu

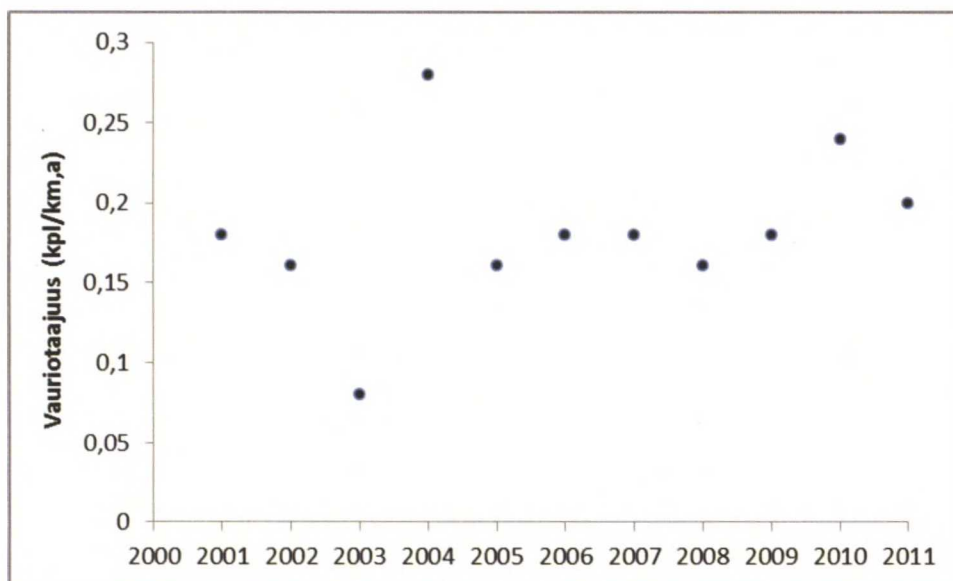
Kaukolämpöverkon huonokuntoisimmat johto-osuudet aiheuttavat vuosittain huomattavia lisämenoeriä, joita voidaan leikata verkkoa perusparantamalla. Vanhojen kaukolämpöjohtojen uudenaikaistamisella on aina saavutettavissa lämpöhäviösäästöt, mutta usein vikaantuvien johtojen tapauksissa säästöpotentiaaleiksi on lisäksi luettavissa lisävesihävikin, korjauskustannusten sekä käyttökeskeytysten yhteydessä mahdollisten lämmöntuotannollisten ja -myynnillisten tappioiden poisjääminen.

Tässä kappaleessa on tarkasteltu perusparantamisen taloudellista kannattavuutta kahden usein korjattavina olleiden esimerkkitapausten avulla. Ensimmäisenä tarkastelussa on Martinlaakson Raappavuorentien yhteydessä kulkeva DN 400 -koon betonielementtikanavainen siirtolinja, joka rakennettu vuonna 1975. Toiseksi tarkastelun kohteeksi on puolestaan valittu Martinlaakson voimalaitoksen edessä Martinkyläntiellä kulkeva DN 500-koon betonielementtikanavainen siirtolinja, joka on rakennettu vuonna 1981. Martinkyläntien linjan perusparannus koskisi yhteensä neljää johto-osuutta, jotta perusparantamisella saavutettaisiin käyttövarmuuden parantuminen.

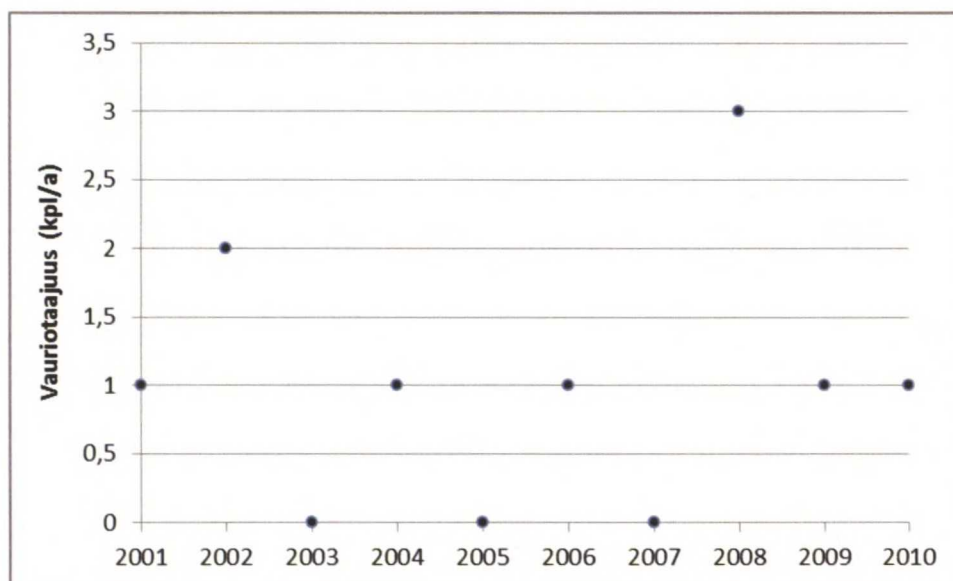
Molempien esimerkkitapausten yhteydessä laskelmissa on huomioitu niin lämpöhäviöistä kuin vuotojen vähenemisestä saavutettavissa olevat säästöt. Martinkyläntien DN 500-linjan tarkastelun yhteydessä on myös huomioitu kustannusvaikutukset putkidimension muuttumisesta kokoluokkaa suuremmaksi. Tulevaisuudessa odotettavissa olevien korjauskustannusten arvioimiseksi on kappaleessa 6.4.1 ensin pohdittu, miten johto-osuuksien vikaantumista ja vauriomääriä pitäisi laskelmissa käsitellä. Perusparantamisen osittamisesta useammalle vuodelle ja investoinnin viivyttämisestä saavutettavissa oleviin korkosäästöihin ei puolestaan ole otettu kantaa, sillä johto-osuuksien korkeiden vikataajuuksien vuoksi vuotoja on odotettavissa sattuvan jo lähitulevaisuudessa. Tällöin korkeat korjauskustannukset syövät investoinnista saavutettavissa olevan hyödyn verkon käyttövarmuuden vaarantuessa samalla.

6.4.1 Vauriokehityksen arvioiminen

Kappaleessa 3.3 pohdittiin mahdollisuuksia johtojen vauriotiheyksien kehittymisen arviointiin tilastotietojen pohjalta. Odotettavissa olevien vauriokustannusten arvioimiseksi tarkastellaankin aluksi ajanjakson 2001–2010 vauriotietojen avulla, minkälaisia vaikutuksia vaurioiden pelkällä korjaamisella voidaan ajatella olevan johtojen vikakehitykseen. Koska etenkin Raappavuorentiellä vauriomäärät ovat absoluuttisesti jääneet melko vähäisiksi (mutta suhteellisesti suuriksi), on vikataajuuden kehitystä tutkittu sekä johtotasolla Martinkyläntien linjan tilastoaineistosta että johtoryhmätasolla valitsemalla tilasto-otannaksi yli DN 250-koon elementtikanavat, joita ei ole juuri perusparannettu ajanjaksolla 2001–2011 (jolloin systeemin tila ei ”häiriöidy” tämän vuoksi). Tällöin ryhmä-otanta kattaa yhteensä 100 vauriota. Laskemalla aineistoista vuosittaiset vauriotaajuudet saadaan kuvan 39 sekä kuvan 40 mukaiset pistekuvaajat.



Kuva 39 Vauriotaajuuden vuotuinen vaihtelu, kun tilasto-otantana on käytetty yli DN 250 -koon betonielementtikanavia.



Kuva 40 Vauriotaajuuden kehitys Martinkyläntiellä ajanjaksolla 2001-2010.

Kuvan 39 ja kuvan 40 perusteella vikataajuuksien kehityksessä ei ole havaittavissa tiettyä kehityssuuntaa, vaan vaikuttaisi sen sijaan vaihtelevan satunnaisesti pysyen kuitenkin kokoajan varsin korkeana. Viittaamalla kuvaajista saatavissa olevaan käsitykseen on alla suoritetuissa kustannuslaskelmissa oletettu, että sekä Raappavuorentien että Martinkyläntien vikataajuudet pysyvät tarkasteluajanjaksolla keskimääräisesti samoina käytettäessä kymmenen vuoden tilastoaineistosta laskettuja keskiarvoja.

6.4.2 Raappavuorentie DN 400

Raappavuorentien johto-osuus on kriittinen lämmöntoimituksen kannalta ja sitä koskeva käyttökeskeytys koskettaa yleensä asiakaskuntaa, joka koostuu noin kolmestakymmenestä kiinteistöstä, joista suuri osa on kerrostaloja. Alueen sopimusteho yhteensä on noin 8 000 kW. Tilastotietojen mukaan johdossa on kymmenen vuoden aikana ollut yhteensä 5 vuotoa, jolloin *johto-osuuden* vikataajuudeksi f_R saadaan 5 kpl/10 a = 0,5 kpl/a. Vuodon korjauksesta on tilastojen mukaan aiheutunut keskimäärin noin 10 tunnin käyttökeskeytys. Pituutta perusparannettavaksi suunnitellulla Raappavuorentien DN 400 johto-osuudella on noin 300 metriä.

Alla on vaiheittain tarkasteltu Raappavuorentien johto-osuuden perusparantamiseen liittyviä säästöpotentiaaleja ja lopuksi laskettu investoinnille sisäinen korkokanta IRR.

Lämpöhäviöt

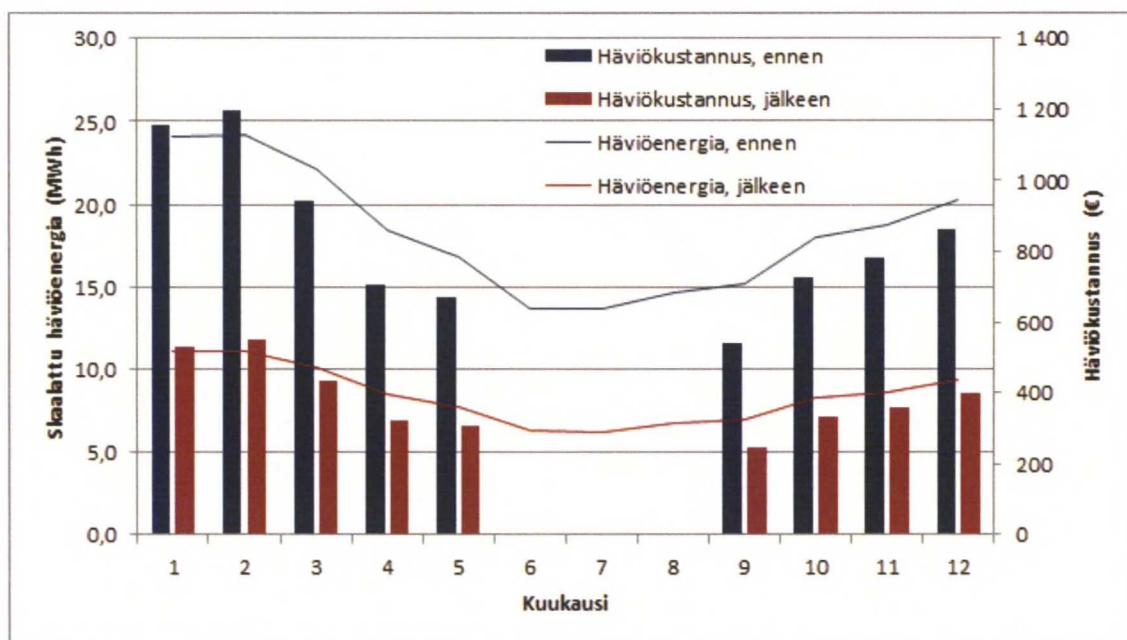
Lämpöhäviöt määritettiin käyttäen kappaleen 4.3.1 lämpöhäviöiden laskentakaavoja sekä liitteessä 1 esitettyjä yhtälöitä lämpövastusten laskemiseen. Kaukolämpöjohtoihin ja -kaivantoihin liittyvät rakennemitat on otettu Vantaan Energian rakentamispöytäkirjoista. Betonielementtikananavan mineraalivillaeristeen lämmönjohtavuutena on käytetty arvoa 0,007 W/mK sillä oletuksella, että eristeen eristyskyky on heikentynyt oleellisesti useiden ja runsaiden kastumisten vuoksi (Sirola 2010a, s. 28). Kiinnivaahdotetun johdon polyuretaanieristeen lämmönjohtavuutena on puolestaan käytetty arvoa 0,029 W/mK (käyttöiän keskimääräinen lämmönjohtavuus), betonin lämmönjohtavuutena 1,7 W/mK, maan lämmönjohtavuutena 1,7 W/mK sekä lämmönsiirtokertoimenä maanpinnalla 14,6 W/m²K. Lämpöhäviötehot laskettiin vuosikeskiarvona käyttäen menoveden lämpötilaa 85°C, paluulämpötilaa 55°C ja häiriöttömän maaperän lämpötilaa +5°C, jolloin vuotuinen häviöenergia saatiin kertomalla keskimääräinen lämpöhäviöteho vuoden pituudella (8760 h). Saadut lämpötehot vanhalle ja uudelle rakenteelle on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3 Raappavuorentien lämpöhäviöt ennen perusparantamista sekä johtojen uusimisen jälkeen.

	Lämpöhäviöt ennen	Lämpöhäviöt jälkeen	Lämpöhäviö- säästö
Häviölämpövirta (W/m)	83,7	38,4	45,4
Lämpöhäviö (kW)	25	12	14
Häviölämpöenergia (MWh)	220	101	119

Lämpöhäviöiden kustannussäästöjen määrittämiseksi lasketut kokonaisvuosihäviöt skaalattiin Vantaan Energian mittaustiedoista saatujen ulko- ja verkostolämpötilojen sekä johto-osuudelle lasketun U-arvon ($W/^{\circ}C$) avulla ensin tuntitasolla, minkä jälkeen tuntitason lämpöhäviöt summaamalla saatiin selville kuukausittaiset lämpöhäviöt. (Lämpöhäviö ajanhetkellä t laskettiin kertomalla vuoden kokonaislämpöhäviöt skaalaustermillä: $U\text{-arvo} \cdot [\text{ulkolämpötilan ja keskimääräisen verkostolämpötilan erotus hetkellä } t] / \Sigma [U\text{-arvo} \cdot \text{ulkolämpötilan ja verkostolämpötilan erotus hetkellä } t]$). Lämpöhäviöiden ositus suoritettiin, jotta pystyttiin huomioimaan lämmöntuotantokustannusten rajahintojen muuttuminen vuoden mittaan. Lämmöntuotannon rajahinnat laskettiin kuukausikeskiarvona vuoden 2011 tuntitason tilastohinnoista.

Kuvassa 41 on esitetty lämpöhäviöiden osittamisella saadut kuukausilämpöhäviöt sekä häviöitä vastaavat kustannukset määritetyillä rajahinnoilla. Mineraalivillaeristeiden erittäin huonosta kunnosta johtuen häviöerot vanhojen ja uusien kaukolämpöjohtojen välillä ovat noin kaksinkertaiset. Kesäkuukausina (kesä-, heinä- ja elokuu) lämpöhäviökustannuksia ei muodostu (rajahinta nolla), sillä tuolloin lämpöhäviöiden ajateltiin toimivan apujäähdytyksenä sähkön tuottamiseksi. Perusparantamisella saavutettavaksi vuotuiseksi kokonaiskustannussäästökseksi 300 metrin matkalta saatiin yhteensä noin 4 110 €.



Kuva 41 Raappavuorentien johto-osuuden kokonaislämpöhäviöiden osittaminen vuoden kaikille kuukausille sekä vuoden 2011 lämmöntuotannon rajahintojen avulla määritetyt häviöitä vastaavat kustannukset.

Lisävesi

Raappavuorentiellä vuotojen arvioitiin tulleen havaituiksi keskimäärin noin kuukauden jälkeen niiden syntymisestä perustuen kokemuseräiseen tietouteen vuotojen kehittymisen jättämistä merkeistä (esimerkiksi eristeiden kastumisen levinneisyydestä). Vuotojen tunnistamista on osaltaan hidastanut tehokas sadevesiviemäröinti, sillä lämpimän kaukolämpöveden sekoittuessa viemäriveriin kaukolämpövesi viilenee, jolloin betonielementtikanavan tuuletusputketkaan eivät höyrytä merkiksi vuodosta.

Vuodot ovat olleet luonteeltaan yläelementin saumakohtiin liittyviä tippuvesiongelmia, joiden seurauksena virtausputkeen on tyypillisesti syntynyt noin tulitikun pään kokoinen reikä ($\varnothing 3$ mm). Käytetään häviövesivirran Q_R arvioimiseksi edellä esitettyä kaavaa 3.6. Koska vuoto voi olla niin meno- kuin paluupuolella, oletetaan keskimääräiseksi paineeksi 7 bar ja veden lämpötilaksi $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, jolloin veden tiheys on $0,98\text{ kg/m}^3$. Yksinkertaistetaan laskentaa lisäksi olettamalla, että reiän koko sekä muoto pysyvät kokoajan samoina, jolloin purkautumiskertoimen arvolla 0,7 saadaan häviövesivirraksi Q_R vuotoa kohden

$$Q_R = Cd \cdot \pi r^2 \cdot \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} = 0,7 \cdot \pi \cdot (1,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{7 \cdot 10^5 \text{ Pa}}{0,98 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} \approx 0,67 \text{ m}^3/\text{h}$$

ja vuodon aikaiseksi vesihävikiksi $V_{\text{ve,R}}$

$$V_{\text{ve,R}} = Q_R \cdot t = 0,67 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 24 \cdot 30 \text{ h} \approx 485 \text{ m}^3,$$

jonka aiheuttama kustannus $K_{\text{ve,R}}$ lisävesikuution maksaessa $3,5 \text{ €/m}^3$ on

$$K_{\text{ve,R}} = 485 \text{ m}^3 \cdot 3,5 \text{ €/m}^3 = 1\,696 \text{ €}.$$

Huolto- ja kunnossapitokustannukset

Raappavuorentien johto-osuudella perusparantamisella ei olisi juuri saavutettavissa huomattavia huolto- ja kunnossapitokustannussäästöjä. Tämä johtuu siitä, että kokonaan poistettavissa olevia kaivoja on vain pari kappaletta, jolloin huoltokohteiden määrä ei merkittävästi vähene, koska tilanne uusissakin kaivoissa on käytävä tarkistamassa aika ajoin. Nykyiset kaivot eivät myöskään huoltotarpeeltaan ole erityisen kuormittavia, sillä niissä ei esimerkiksi esiinny erityistä tarvetta ulkopuolisen veden poispumppaamiselle. Toisaalta vaikka kunnossapitokustannukset eivät sinänsä juuri alene, niin poistamalla elementtilinjasta esimerkiksi tyhjennyskaivo, poistetaan samalla potentiaalinen vauriokohta. (Siitonen 2012)

Vuodon korjauskustannukset

Vantaan Energialta ei löydy tilastomateriaalia toteutuneista vuotojen korjauskustannuksista, mutta suuntaa antavana arviona voidaan käyttää ET:n julkaisemassa vaurioutilastossa (Energiateollisuus 2011d) jäsenyrityksiltä saatujen tietojen perusteella laskettuja keskimääräisiä arvoja. Suurimman kokoluokan ($\geq \text{DN } 250$) betonielementtikanaavien korjauskustannukset vuonna 2010 olisivat tilaston mukaan olleet noin 22 000 €. Kustannusvertailu lähivuosiin (2005–2010) kuitenkin osoittaa, että kyselyvastausten perusteella saadut keskimääräiset kustannukset ovat vaihdelleet voimakkaasti välillä 11 000–27 000 €. Suuren hajonnan vuoksi tästä voitaneenkin

tulkita, että toteutuneet kustannukset ovat voimakkaasti sidoksissa esimerkiksi korjauskohteen laajuuteen sekä korjausympäristön haastavuuteen.

Korjauksen välilliset kustannukset

Vuotojen korjaus ja käyttökeskeytys Raappavuorentiellä aiheuttaa sopimusteholtaan noin 1-8 MW:n, keskimäärin 4 MW:n, asiakasryhmälle lämmöntoimituksen keskeytymisen riippuen vuotokohdan tarkemmasta sijainnista sekä keskeytysalueen rajaumahdollisuuksista sulkujen avulla. Sopimusteholla tarkoitetaan asiakkaan käyttöön varattua suurinta tuntista lämpötehoa, ja se sisältää niin rakennuksen kuin käyttöveden lämmitykseenkin tarvittavan lämpötehon.

Raappavuorentien käyttökeskeytyksen koskettaessa asuinkiinteistöjä syntyy myymättä jääneen lämmön kustannusvaikutus tässä tapauksessa siitä lämpöenergian määrästä, joka olisi kulunut käyttöveden lämmittämiseen, kuten kappaleessa 4.3.5 todettiin. Myymättä jääneen lämmön määrä on siten paljolti sidoksissa siihen, mihin aikaan päivästä keskeytys on: yöaikaan ihmisten nukkuessa kustannusvaikutusta ei syntyisi lainkaan.

Kustannusten suuruusluokan hahmottamiseksi tarkastellaan ensin tilannetta, jossa lämpimän käyttöveden kulutus olisi mitoitusstehon mukaisesti maksimissaan koko käyttökeskeytyksen ajan. Käyttökeskeytysalueen sopimustehon, $\Phi_{\text{sop,R}}$, ollessa 4 MW (josta 25 % mitoitettu lämpimälle käyttövedelle) ja lämpökatkoksen kestäessä 8 h olisi myymättä jäävän lämpöenergiamäärän teoreettinen yläraja, $W_{\text{myymättä,maks}}$

$$W_{\text{myymättä,maks}} = 0,25 \cdot \Phi_{\text{sop,R}} \cdot t = 0,25 \cdot 4 \text{ MW} \cdot 8 \text{ h} = 8 \text{ MWh},$$

jolloin lämmintä käyttövettä käytettäisiin kaikissa kiinteistöissä koko käyttökeskeytyksen ajan. Tämän lämpöenergian arvo määräytyy lämmöstä saatavan katteen perusteella. Kaukolämmön hinnoittelua ohjaa kilpailulainsäädäntö, jonka mukaan kaukolämmön hintatason on oltava kohtuullista ja kustannusvastaavaa turvaten kuitenkin lämpöyhtiön toiminnan jatkuvuuden (Koskelainen et al. 2006, s. 470–472). Jos lämmön katteen $C_{\text{lämpö}}$ oletetaan olevan noin 6 €/MWh, saadaan maksimikatemienetykseksi (maksimaaliseksi välilliseksi korjauskustannukseksi) tällöin

$$K_{\text{väl,maks}} = W_{\text{myymättä,maks}} \cdot C_{\text{lämpö}} = 8 \text{ MWh} \cdot 6 \text{ €/MWh} = 48 \text{ €}.$$

Ottaen huomioon melko epärealistisen lähtöoletuksen käyttöveden kulutuksesta käyttökeskeytyksen aikana voidaan tuloksesta todeta, että kotitalouksille myymättä jäävän lämmön arvo on hyvin olematon.

Perusparannuskustannukset

Raappavuorentien perusparannettava johto-osuus olisi pituudeltaan noin 300 metriä. Vanha kaukolämpöjohto jouduttaisiin purkamaan, sillä uusi johto pitäisi sijoittaa kulkemaan pitkin vanhaa linjausta. Vanhan rakenteen poispurkaminen nostaakin huomattavasti oletettavissa olevia perusparannuskustannuksia ($K_{\text{pp,R}}$) ja niiden arvioitiin muodostuvan noin 50 % uudisrakentamista kalliimmaksi. Taulukon 1 perusteella uudisrakentamiskustannukset DN 400 -kokoiselle kaukolämpöjohdolla olivat vuonna 2010 keskimäärin 711 €/m, jolloin perusparannuksen kustannusarvioksi saadaan

$$K_{\text{pp,R}} = 1,5 \cdot 711 \text{ €/m} \cdot 300 \text{ m} = 319\,950 \text{ €}.$$

Yhteenveto Raappavuorentien perusparantamisen kustannustarkastelusta

Määritetään seuraavaksi edellä laskettujen säästöpotentiaalien ja perusparannuskustannusten avulla perusparantamisen taloudellinen kannattavuus. Laskelmissa käytetyt kaavat on esitetty luvussa 4.3.8, lähtötiedot sekä edellä määritetyt säästöpotentiaalit puolestaan taulukossa 4.

Taulukko 4 Kannattavuuslaskelmissa käytetyt lähtötiedot sekä kustannustekijät Raappavuorentiellä.

Lähtötiedot	
Vikataajuus, f	0,5 kpl/a
Korkokanta, r	8 %
Inflaatio	2 %
Investoinnin pitoaika, n	30 a
Säästöpotentiaalit €/a	
Lämpöhäviöt	4 410
Huolto- ja kunnossapito	0
Lisävesi	466
Korjauskustannukset	11 000
Korjausten välilliset kustannukset	0
Yhteensä	15876
Perusparannuskustannukset	319 950 €

Taulukossa 4 ilmoitetut lisävesi- ja korjauskustannukset edustavat odotusarvollisia vuosikustannuksia, jotka on saatu kertomalla yhteen korjaukseen liittyvät kustannukset johto-osuuden vikataajuudella. Korjauksen välillisiä kustannuksia ei kannattavuustarkastelussa noteerata, sillä niiden suuruuteen todettiin edellä liittyvän paljon epävarmuutta ja huonoimmassakin tapauksessa ne jäävät hyvin marginaalisiksi. Tarkasteluajanjakson vuotuisiin kassavirtoihin on laskelmissa lisätty 2 prosentin inflaation vaikutus. Investoinnille lasketut nettonykyarvo (NPV), sisäinen korkokanta (IRR) sekä koroton takaisinmaksuaika on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5 Raappavuorentien johto-osuuden perusparantamiselle lasketut kannattavuuden tunnusluvut.

Investoinnin kannattavuuden tunnusluvut	
NPV	-85 723 €
IRR	5,29 %
Koroton takaisinmaksuaika	19,0 a

Lasketuista tunnusluvuista voidaan huomata, ettei johto-osuuksien perusparantamista voida perustella taloudellisesti kannattavana investointina. Investoinnin nettonykyarvo jää vielä 30 vuoden pitoajan jälkeen tappiolliseksi noin 86 000 €. 30 vuoden pitoajalla

investoinnista tulisi kannattava vasta korkokannan ollessa alle 5,29 %. Arvioitujen säästöpotentiaalien perusteella korottomaksi takaisinmaksuajaksi saadaan 19 vuotta. Takaisinmaksuaika kuvaa etenkin näin pitkillä ajanjaksoilla hyvin huonosti todellista takaisinmaksuaikaa, sillä menetelmä jättää korot huomioimatta.

6.4.3 Martinkyläntie DN 500

Martinkyläntien linja toimii lämmönsiirron kannalta kriittisenä siirtoyhteytenä Martinlaakson voimalaitokselta Itä-Vantaalle. Lämpöä pystytään toimittamaan Itään myös sen alapuolella kulkevan DN 400 -linjan avulla, mutta yhden putkidimension kokoerosta johtuen DN 400:n siirtokapasiteetti ei riitä korvaamaan DN 500 -linjaa kuin kesäaikaan. Muina aikoina sattuvat käyttökeskeytykset Martinkyläntien linjassa pakottavat lämmöntuotantoon lämpökeskuksissa. Käyttökeskeytys Martinkyläntiellä ei aiheuta tällöin varsinaisia lämmöntoimituskatkoksia kaukolämpöasiakkaille, mutta sen sijaan siirtorajoituksen verkkoon, mikä puolestaan aiheuttaa Martinlaakson yhteistuotantolaitokselle lämmöntuotantorajoituksen. Lämmöntuotantorajoituksen suuruus riippuu tapauskohtaisesti siitä, kuinka paljon lämpöä pystytään keskeytyshetkellä syöttämään Länsi-Vantaalle ja DN 400 -linjan läpi Itään.

Martinkyläntien linjaa joudutaan korjaamaan hyvin usein. Vuotoja linjassa on tilaston mukaan ollut kymmenen vuoden aikana 9 kappaletta, jolloin vikataajuudeksi *Martinkyläntiellä* f_M saadaan $9 \text{ kpl}/10 \text{ a} = 0,9 \text{ kpl/a}$. Vuodon korjauksesta aiheutunut käyttökeskeytys on ollut kestoltaan keskimäärin 10 tuntia. Perusparannettavaksi suunniteltujen johto-osuuksien yhteispituus on noin 1 000 metriä ja perusparannuksen yhteydessä linjan koko olisi tarkoitus muuttaa samalla putkidimensiota isommaksi, DN 600:ksi, jotta siirtokapasiteettia saataisiin lisättyä vastaamaan paremmin nykyistä kulutustilannetta.

Alla on samoin kuin Raappavuorentien tapauksessa käyty vaiheittain läpi Martinkyläntien linjan perusparantamiseen liittyviä kustannusnäkökulmia ottaen huomioon lisäksi lämmöntuotantorajoituksen aiheuttamat kustannusvaikutukset sekä putkidimension muuttumisesta saavutettava hyöty.

Lämpöhäviöt

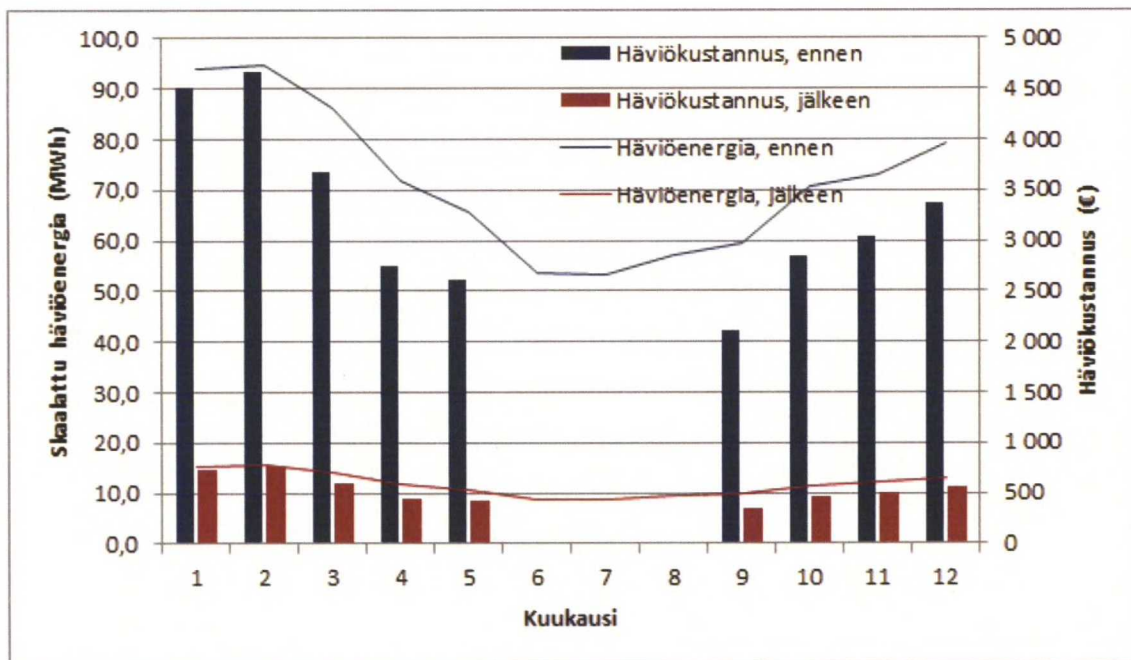
Kuten Raappavuorentien tapauksessa myös Martinkyläntiellä lämpöhäviöt määritettiin ensin koko vuodelle, minkä jälkeen ne ositettiin vuoden jokaiselle kuukaudelle, jotta voitiin huomioida häviöiden rajahintojen muuttuminen. Eristeen, betonin sekä maaperän lämmönjohtavuuksina käytettiin samoja arvoja kuin Raappavuorentiellä ja rakennemitat otettiin niin ikään Vantaan Energialla käytettävistä mittapiirustuksista.

Taulukossa 6 on esitetty lämpöhäviöiden laskemisesta saadut tulokset. Martinkyläntien putkidimension muuttuessa DN 600:ksi perusparantamisen yhteydessä laskettiin vertailun vuoksi muuttuneet kokonaislämpöhäviöt sekä DN 500:lle että DN 600:lle. Tuloksista havaitaan, että putkidimension kasvattaminen lisää lämpöhäviöitä pienempään dimensioon verrattuna. Vuotuiset kokonaislämpöhäviöt perusparannettavalta yhden kilometrin matkalta ovat DN 600:lla noin 20 MWh suuremmat kuin DN 500:lla.

Taulukko 6 Yhteenveto lämpöhäviöiden laskemisesta saaduista tuloksista Martinkyläntiellä.

	Lämpöhäviöt ennen (DN 500)	Lämpöhäviöt jälkeen (DN 500)	Lämpöhäviöt jälkeen (DN 600)	Lämpöhäviö- säästö (DN 500)	Lämpöhäviö- säästö (DN 600)
Häviölämpövirta (W/m)	98,1	46,4	53,5	51,7	44,6
Lämpöhäviö (kW)	98	14	16	84	82
Häviölämpöenergia (MWh)	859	122	141	737	718

Vuoden eri kuukausille ositetut lämpöhäviömäärät ilmenevät puolestaan kuvasta 42. Perusparantamisella saavutettavat lämpöhäviösäästöt ovat vielä Raappavuorentietäkin suuremmat, sillä Martinkyläntien perusparannettava matka on noin kolminkertainen Raappavuorentien johto-osuuteen verrattuna. Vuotuiseksi häviöiden kokonaiskustannussäästöksi saatiin yhteensä noin 24 750 €.



Kuva 42 Martinkyläntien linjalla vuoden eri kuukausille ositetut lämpöhäviöt sekä ennen että jälkeen (uuden dimension ollessa DN 600) perusparantamisen. Lisäksi kuvassa on laskettuna häviöitä vastaavat kustannukset käyttäen lämmöntuotannon rajahintojen kuukausikeskiarvoja vuonna 2011.

Lisävesi

Martinkyläntien linjan tärkeyden vuoksi sitä pidetään silmällä keskimääräistä tarkemmin, minkä vuoksi siinä olleet vuodot havaitaan melko nopeasti, arviolta noin kahden viikon kuluessa niiden syntymisestä. Kaukolämpökanavan vedenpoistossa on Martinkyläntiellä onnistuttu hyvin, jolloin ulkopuolisen veden aiheuttamat putkivuodot ovat olleet tyypiltään pääosin niin kutsuttuja tulitikkureikiä, jotka ovat syntyneet yläelementtien saumojen tippuvedestä. Käyttämällä muilta osin samoja oletuksia kuin Raappavuorentiellä saadaan myös Martinkyläntien vuodon häviövesivirraksi, Q_M , $0,67 \text{ m}^3/\text{h}$ ja vuodon aikaiseksi vesihävikiksi, $V_{ve,M}$,

$$V_{ve,M} = Q_M \cdot t = 0,67 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 24 \cdot 14 \text{ h} \approx 226 \text{ m}^3,$$

jonka aiheuttama kustannus $K_{ve,M}$ lisävesikuution maksaessa $3,5 \text{ €/m}^3$ on

$$K_{ve,M} = 226 \text{ m}^3 \cdot 3,5 \text{ €/m}^3 = 791 \text{ €}.$$

Huolto- ja kunnossapitokustannukset

Martinkyläntien linjan perusparannuksen yhteydessä käytöstä poistuu lukumäärällisesti vain muutama kaivo, mutta kunnossapitokustannusten arvioidaan silti pienentyvän vuositasolla huomattavasti. Tämä johtuu johtorakenteen muuttumisesta saatavasti hyödystä, sillä nykytilanteessa osassa linjan kaivoista täytyy käydä pumppaamassa vettä pois päivittäin keväällä (huhti- ja toukokuussa) ja syksyllä (loka- ja marraskuussa). Rakenteen muuttumisen myötä käyntitiheys pienenee oleellisesti, minkä vuoksi työmiestuntien vähentyessä odotettavissa on noin 1600 euron vuosisäästö.

Vuodon korjauskustannukset

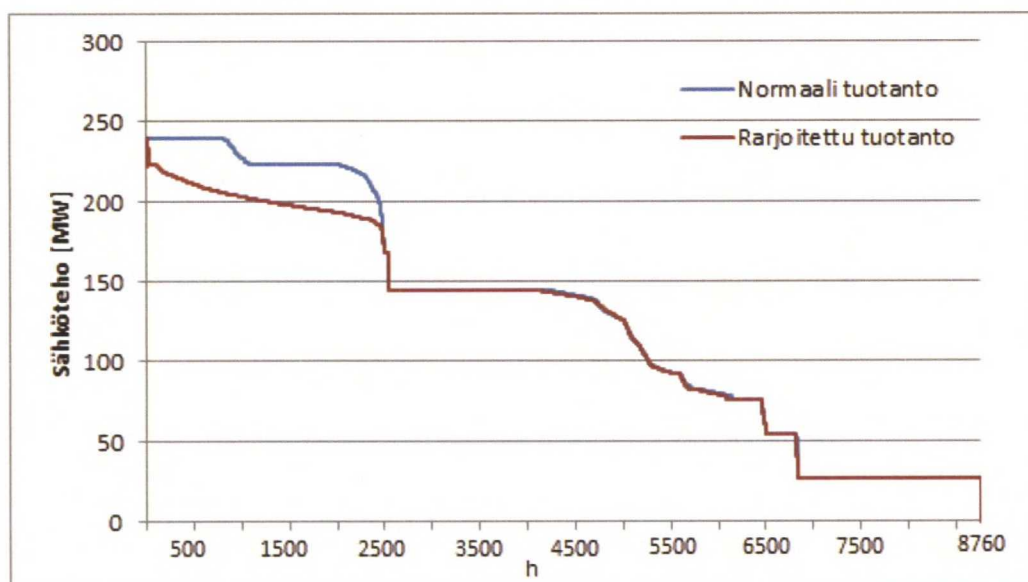
Vuodon korjauskustannusten on oletettava Martinkyläntiellä olevan samaa luokkaa kuin Raappavuorentiellä, eli noin 22 000 €.

Korjauksen välilliset kustannukset

Vuodon korjaus ja käyttökeskeytys Martinkyläntiellä ei suoraan aiheuta tietylle asiakaskunnalle lämpökeskeytystä, sillä lämpö asiakkaille voidaan tuottaa vaihtoehtoisesti myös lämpökeskuksissa tai kesäaikaan siirtää DN 400 -linjaa pitkin. Lämmityskauden aikana linjan käyttökeskeytys kuitenkin synnyttää verkkoon siirtorajoituksen, jonka suuruus riippuu siitä, kuinka paljon lämpöä saadaan menemään DN 400 -johdon läpi Itään ja kuinka paljon syötettyä Länsi-Vantaalle. Verkon siirtorajoituksen vuoksi Martinlaakson yhteistuotantolaitokselle aiheutuu puolestaan lämmöntuotantorajoitus, jolloin samalla menetetään myös voimalaitoksen rakennusasteen mukainen vastapainesähköntuotanto. Siirtorajoituksen aiheuttama kustannusvaikutus syntyy siten toisaalta lämmön kalliimman lämpökeskustuotannon ja toisaalta sähkönmyynnistä saamatta jäävän katteen yhteisvaikutuksesta.

Siirtorajoituksen kustannusvaikutusta tutkittiin koko tuotantokapasiteetin sekä lämpöakun käytön huomioivan tuotannonoptimointimallin avulla. Optimointimalli optimoi tuotantoa lämpötilatietojen sekä polttoaineiden, päästöoikeuksien, verojen ja sähkön oletettujen hintatietojen perusteella. Tuotanto optimoitiin aluksi vuoden jokaiselle tunnille normaalitilanteessa ja tämän jälkeen siirtorajoituksen ollessa voimassa. Kuvassa 43 on esitetty mallin optimoimien tuotantotehojen perusteella piirretyt sähköntuotannon pysyvyyskäyrät molemmissa tilanteissa. Normaalin ja

rajoitetun tuotannon pysyvyyskäyrien väliin jäävä pinta-ala kuvaa vuoden aikana menetettyä sähköntuotantoa, jota kuvaajan perusteella syntyisi vuoden aikana noin 2 500 tunnin ajalta.



Kuva 43 Sähköntuotannon pysyvyyskäyrät sekä normaalissa että rajoitetussa tuotannossa.

Lämmöntuotannon optimoinnin osalta malli laski, kuinka tuotanto tulisi jakaa eri tuotantolaitosten ja polttoaineiden käytön kesken tuntitasolla. Tuotannollisten vaikutusten selvittämisen jälkeen laskettiin taloudellinen vaikutus sille, että siirtorajoitus pysyisi voimassa koko vuoden.

Kustannusvaikutus muodostuu karkeasti polttoainekustannusten (hankinta + verot) erotuksen sekä menetetyn sähköntuotannon arvosta. Polttoaineiden vuodenaikaiset hankintakustannukset molemmissa tilanteissa saatiin laskemalla tuotantoon käytettyjen hiilen, kaasun ja lisäkaasun määrät (MWh) ja kertomalla kokonaiskulutukset tämän jälkeen vastaavilla polttoaineiden hinnoilla. Tuotannon polttoaineverot laskettiin huomioimalla sähköntuotannon polttoaineiden verottomuus, yhteistuotannon lämpökeskustuotantoa alhaisempi verokanta sekä osittamalla yhteistuotannon tapauksessa polttoaineiden kulutuksesta 90 % (Rantakokko 2010, s. 17–18) lämmöntuotannolle. Laskuissa polttoaineiden hintoina ja polttoaineveroina käytettiin taulukossa 7 ilmoitettuja lukuarvoja.

Taulukko 7 Laskuissa käytetyt polttoaineiden hinnat ja polttoaineverot.

	Hinnat [€/MWh]	Verot [€/MWh]
Kaasu	30	13,72
Hiili	15	18,08
Lisäkaasu	35	
Yhteistuotanto kaasu		10,75
Yhteistuotanto hiili		12,94

Sähköntuotannon arvot laskettiin käyttämällä mallin antamia sähkön tuntihintoja. Yhteenveto tuotantoon käytettyjen polttoaineiden hankintakustannuksista, polttoaineveroista ja sähköntuotannon arvosta sekä normaalin että rajoitetun tuotannon tapauksissa on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8 Polttoaineiden hankintakustannukset, polttoaineverot sekä sähköntuotannon arvo normaalin ja rajoitetun tuotannon tapauksissa.

	Normaali tuotanto [k€]	Rajoitettu tuotanto [k€]	Kustannus- vaikutus [k€]
Polttoaineiden hankintakustannus	59 831	59 838	6
Polttoaineiden valmisteverot	15 595	15 807	212
Sähköntuotanto	55 657	46 024	9 632
Yhteensä			9 850

Vaikka sähköntuotanto vähenee, eivät polttoainekustannukset juuri muutu, koska lämmöntuotantoa joudutaan korvaamaan kalliimmalla lämpökeskustuotannolla. Mikäli lämmöntuotantorajoitus olisi voimassa koko vuoden ajan, menetettäisiin vuoden aikana yhteensä noin 9,9 M€. Jos vuoden todennäköisyyden ja sen korjauksesta aiheutuvan käyttökeskeytyksen ajatellaan olevan yhtä todennäköisiä vuoden kaikkina ajanhetkinä, voidaan korjauksen välillisten kustannusten, $K_{\text{väl},M}$, (käyttökeskeytyksen keston ollessa keskimäärin 8 h) arvioida olevan keskimäärin

$$K_{\text{väl},M} = 9\,850 \text{ k€} \cdot (8/8760) \approx 9\,000 \text{ €}.$$

Pahimmillaan yhteistuotantoon vaikuttavien ja täysin ennalta arvaamatta syntyvien käyttökeskeytysten aiheuttamat taloudelliset tappiot voivat kuitenkin nousta edellä

laskettua keskimääräistä arvoa moninkertaisiksi riippuen sähkön ja tuotantopolttoaineiden hinnoista. Useimmiten äkillisten häiriötilanteiden yhteydessä Martinlaakson tuotannosta puolet on saatu ylös 5-10 tunnin kuluessa ja loputkin 24 tunnin sisällä. Keskeytyksistä on todellisuudessaakin aiheutunut suuruusluokaltaan jopa parinsadantuhannen euron tappiot, mutta kaukolämpöverkon rikkoutuminen ei yleensä ole kovin pitkäkestoinen tuotantohäiriö. (Lehtiniemi 2012)

Esimerkiksi talvella nykytuotantokapasiteetin aikana putken repeytyminen voi sähköntuotannon kannalta johtaa siihen, että pari höyryblokkia tulee Martinlaaksossa alas täydestä tuotannosta, mikä tehollisesti vastaa noin 120 MW. Menetetty sähköntuotanto joudutaan ostamaan tilalle sähkömarkkinoilta, jolloin kustannusvaikutus riippuu sähkön tunnittaisista hinnoista muuttuvan tuotantokustannuksen pysyessä vakiona (suuruusluokaltaan 40 €/MWh). (Lehtiniemi 2012) Esimerkiksi talvella 2009 sähkön Elspot Suomen aluehinnan nähtiin kahden tunnin ajalta yltävän ennätykseensä 1 400 €/MWh (Fingrid 2012), jolloin jo näiden kahden tunnin ajalta pelkän sähkön osalta tappioita olisi syntynyt noin 326 000 €. Näin korkeita sähkönhintoja ei kuitenkaan tämän jälkeen ole nähty, vaan hinta on talvisin käynyt enää reilun parin sadan euron megawattituntihinnan paikkeilla (Fingrid 2012).

Sähköntuotannon alastulon aiheuttamien kustannusten lisäksi toinen merkittävä kustannuserä muodostuisi vielä, kun yhteistuotantolämmön halpa hiilituotanto jouduttaisiin korvaamaan kalliimmalla kaasulla lämpökeskuksissa. Hiilellä on tehty lämpöä 150 MWh, ja jos hiilen tuotantokustannus kaukolämmölle olisi karkeasti noin 30 €/MWh ja lämpökeskustuotantokustannus kaasulla 50 €/MWh, syntyisi tästä tappiota $(50-30) \text{ €/MWh} \cdot 150 \text{ MWh} = 3000 \text{ €/h}$. (Lehtiniemi 2012)

Häiriötilanteen aiheuttamien kokonaiskustannusten muodostumisen hahmottamiseksi pahimmillaan tarkastellaan seuraavaksi, mitä tuotannon alastulo olisi merkinnyt esimerkiksi viime talvena 2012, jos häiriö olisi sattunut ajankohtana, jolloin sähkön pörssihinta liikkui yli sadassa eurossa megawattitunnilta. Alla olevassa taulukossa 9 on sähkön Elspot Suomen aluehinnat vuorokauden ajalta helmikuussa, jolloin megawattitunnin hinta kävi 253,92 eurossa. (Fingrid 2012)

Taulukko 9 Elspot Suomen aluehinta vuorokauden ajalta helmikuussa 2012. Lähde: Fingrid 2012

Suomen aika	Hinta €/MWh	Suomen aika	Hinta €/MWh
2012-02-02T08:00	253,92	2012-02-02T20:00	100
2012-02-02T09:00	224,97	2012-02-02T21:00	66,22
2012-02-02T10:00	134,98	2012-02-02T22:00	56,19
2012-02-02T11:00	144,46	2012-02-02T23:00	49,53
2012-02-02T12:00	150,03	2012-02-03T00:00	44,01
2012-02-02T13:00	129,97	2012-02-03T01:00	45,9
2012-02-02T14:00	72,73	2012-02-03T02:00	43,8
2012-02-02T15:00	84,48	2012-02-03T03:00	42,16
2012-02-02T16:00	79,08	2012-02-03T04:00	42,52
2012-02-02T17:00	164,04	2012-02-03T05:00	44,08
2012-02-02T18:00	234,38	2012-02-03T06:00	60,06
2012-02-02T19:00	124,95	2012-02-03T07:00	211,92

Mikäli putken repeämisestä olisi tuolloin tuotannolle aiheutunut kaiken kaikkiaan vuorokauden kestänyt ajasalotila, josta seitsemän tunnin jälkeen tuotannosta puolet olisi saatu käyntiin, olisi taulukon hinnoilla jo pelkästään sähkön osalta kustannuksia syntynyt noin 149 000 €. Kun tähän vielä lisätään kustannukset lämmöntuotannosta, nousisivat kokonaiskustannukset jo lähemmäs kolmeensataantuhanteen euroon, esimerkkiluvuilla noin 195 000 euroon, joka on suuruudeltaan yli 20-kertainen verrattuna edellä laskettuun keskimääräiseen estimaattiin.

Putkidimension muuttuminen

Edellä laskettujen lämpöhäviövaikutusten lisäksi putkidimension muuttuminen vaikuttaa myös putkissa syntyviin painehäviöihin (kappale 4.3.6). Painehäviömuutoksia tarkasteltiin Vantaan kaukolämpöverkon simulointimallin avulla määrittämällä painehäviöt ensin linjan koon ollessa DN 500 ja tämän jälkeen muuttamalla linjan kooksi DN 600.

Simuloinnin tuloksena Martinkyläntien johto-osuuden tilavuusvirraksi saatiin noin 450 l/s. Linjan koon ollessa DN 500 menoputken painehäviöt, $\Delta p_{v,M,s1}$, olivat 0,89 bar/km ja paluupuolen painehäviöt, $\Delta p_{v,M,r1}$, 0,87 bar/km, jolloin johdon yhteenlasketuiksi painehäviöiksi alkutilanteessa saadaan

$$\Delta p_{v,M1} = \Delta p_{v,M,s1} + \Delta p_{v,M,r1} = (0,89+0,87) \text{ bar/km} = 1,76 \text{ bar/km}.$$

Kun linjan koko kasvatettiin DN 600:ksi, tippuivat menoputken painehäviöt, $\Delta p_{v,M,s2}$, 0,37 bar:iin/km ja paluupuolen häviöt, $\Delta p_{v,M,r2}$, 0,36 bar:iin/km, eli painehäviöt johdossa dimensiomuutoksen jälkeen olisivat yhteensä

$$\Delta p_{v,M2} = \Delta p_{v,M,s2} + \Delta p_{v,M,r2} = (0,36+0,37) \text{ bar/km} = 0,73 \text{ bar/km}.$$

Perusparannettavan matkan ollessa 1 000 metriä olisi putkidimension kasvattamisella saavutettava painehäviösäästö tällöin

$$\Delta p_{v,M1} - \Delta p_{v,M2} = (1,76-0,73) \text{ bar/km} \cdot 1,0 \text{ km} = 1,03 \text{ bar}.$$

Pumpun hyötysuhteen, η , ollessa 0,7 saadaan pumppaustehon kaavalla 3.10 pumppaustehosäästökseksi

$$P_{p,M} = \frac{\dot{V} \rho g H}{\eta} = \frac{\dot{V} \Delta p}{\eta} = \frac{0,45 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1,03 \cdot 10^5 \text{ Pa}}{0,7} = 0,07 \text{ MW}$$

Pumppaushäviöiden voidaan ajatella muuttuvan lämmöksi, jolla korvataan muuta lämmöntuotantoa. Tällöin pumppaushäviöistä aiheutuva kustannusvaikutus saadaan laskettua vähentämällä ikään kuin sähköllä tuotetun lämmön kustannuksista samanaikaisesti säästetty lämmöntuotantokustannus. Lämmöntuotantokustannukset riippuvat siitä, onko lämpö tuotettu yhteistuotannossa vai lämpökeskuksissa. Lämpökeskuslämmön hinta vaihtelee polttoaineiden hinnan mukaan. Tässä tarkastelussa lämpökeskuksissa tuotetun lämmön kustannusten on ajateltu vastaavan aina likipitäen sähkön hintaa, jolloin kustannusvaikutusta lämmön tuotannosta sähköllä ei synny. Jos pumppaussähköllä tuotettu lämpö korvaa sen sijaan yhteistuotannolla tuotettua lämpöä, kustannusvaikutus syntyy. Lasketaan seuraavaksi, minkä suuruisen lisäkustannuksen edellä laskettu ero painehäviöissä eri putkidimensioiden välillä vuosittain aiheuttaa, jos putkikokoa ei muuteta.

Kustannusvaikutuksen laskemiseksi käytetään voimalaitoksen rakennusasteena arvoa 0,5 sekä sähkön tukkuhintana, $h_{\text{sähkö}}$, 40 €/MWh, sähköstä saatavana katteena, $C_{\text{sähkö}}$, 20

€/MWh ja yhteistuotantolämmön tuotantokustannuksena, K_{yhL} , 25 €/MWh. Kun pumppaussähköllä tuotetaan 1 MWh lämpöä, jää samalla tuottamatta 1 MWh yhteistuotantolämpöä, jolloin voimalaitoksen rakennusasteen mukaisesti syntyy myös sähkökatteen menetys, jonka suuruus on

$$K_{myymättä,sähkö} = 0,5 \cdot C_{sähkö} = 0,5 \cdot 20 \text{ €/MWh} = 10 \text{ €/MWh}.$$

Tällöin pumppaushäviöiden "ansiosta" säästetty lämmöntuotantokustannus ei ole suoraan lämmön tuotantokustannus 25 €/MWh, vaan lisäksi on huomioita sähkön katemenetys, jolloin varsinaiseksi yhteistuotantolämpösäästökseksi saadaan

$$S_{yhL} = K_{yhL} - K_{myymättä,sähkö} = (25-10) \text{ €/MWh} = 15 \text{ €/MWh}.$$

Näin ollen vähentämällä sähkön tukkuhinnasta edellä laskettu säästettävä lämmöntuotantokustannus saadaan pumppaushäviöiden lisäkustannusvaikutukseksi

$$K_{pump} = h_{sähkö} - S_{yhL} = (40-15) \text{ €/MWh} = 25 \text{ €/MWh}.$$

Jos pumppaussähköllä tuotetun lämmön ajatellaan vuodessa korvaavan yhteistuotantolämpöä 3 000 h, saadaan liian pienen putkidimension aiheuttamiksi vuotuisiksi ylimääräpumppauskustannuksiksi eli säästöpotentiaaliksi S_{pump}

$$S_{pump} = P_p \cdot 3\,000 \text{ h} \cdot K_{pump} = 0,07 \text{ MW} \cdot 3\,000 \text{ h} \cdot 25 \text{ €/MWh} \approx 4\,970 \text{ €}.$$

Putkilinjan yhden kilometrin matkalta laskettiin edellä lämpöhäviöitä syntyvän noin 20 MWh enemmän, jonka rahallinen arvo käytettäessä rajahintojen vuosikeskiarvoa vuonna 2011 (kesäkuukausien rajahintana nolla €) vastaa noin 630 euroa. Putkidimension kasvattaminen on siten kokonaistaloudellisesti kannattava ratkaisu lämpöhäviöiden kasvusta huolimatta.

Perusparannuskustannukset

Perusparantaminen ajoitetaan suoritettavaksi kesäaikaan, jolloin Itä-Vantaan tarvitsema lämpö pystytään siirtämään DN 400 -linjaa pitkin, eikä yhteistuotannolle aiheudu

lämmöntuotantorajoitusta. Perusparannuskustannuksiksi on arvioitu noin 1 500 €/m, mikä pitää sisällään materiaali-, asennus- sekä maanrakennuskulut. Osalla matkaa voidaan joutua louhimaan kalliota, mikä on huomioitu kustannuksia nostavana tekijänä. Varmaa tietoa siitä, saako vanhan elementin jättää maahan, ei ole. Näillä oletuksilla koko linjan perusparannuskustannuksiksi saadaan

$$K_{pp,M} = 1\,500\text{ €/m} \cdot 1\,000\text{ m} = 1\,500\,000\text{ €}.$$

Koko linjan kerralla perusparantaminen tulisi näin ollen hyvin kalliiksi ja sitoisi runsaasti resursseja. Tämän vuoksi linja perusparantaminen joudutaankin olosuhteiden pakosta jakamaan kahteen osaan, ei korkosäästöjen saavuttamiseksi.

Yhteenveto perusparantamisen kustannuksista Martinkyläntiellä

Alla on Raappavuorentien tarkastelun tapaan esitetty kannattavuuslaskelmissa käytetyt lähtötiedot (taulukko 10). Säästöpotentiaaleista lisävesi-, korjaus- sekä korjauksen välilliset vuosikustannukset on saatu kertomalla yksittäiseen vuotoon liittyvät kustannukset linjan vikataajuudella 0,9.

Taulukko 10 Investoinnin kannattavuuslaskelmien lähtötiedot Martinkyläntiellä.

Lähtötiedot	
Vikataajuus, f	0,9 kpl/a
Korkokanta, r	8 %
Inflaatio	2 %
Investoinnin pitoaika, n	30 a
Säästöpotentiaalit €/a	
Lämpöhäviöt	25 790
Pumppauskustannukset	4 970
Huolto- ja kunnossapito	1 600
Lisävesi	377
Korjauskustannukset	24 200
Korjausten välilliset kustannukset	9 895
Yhteensä	66 832
Perusparannuskustannukset	1 500 000 €

Taloudelliselta kannattavuudeltaan Martinkyläntien linjan perusparantaminen osoittautui Raappavuorentietäkin huonommaksi (taulukko 11) huolimatta vieläkin suuremmista vuotuisista säästöpotentiaaleista. Tuloksen selittävät Martinkyläntien uusittavan pätkän lähes viisinkertaiset kokonaisperusparannuskustannukset. Investoinnin nettonykyarvo jäi 30 vuoden pitoajan jälkeen tappiolliseksi vielä noin 660 000 € ja 30 vuoden pitoajalla investoinnista tulisi taloudellisesti kannattava vasta tuottovaatimuksen ollessa alle 3,24 %. Koroton takaisinmaksuaika olisi puolestaan noin 25 vuotta.

Taulukko 11 Yhteenveto investoinnin kannattavuuslaskelmien tuloksista.

Investoinnin kannattavuuden tunnusluvut	
NPV	-663 450 €
IRR	3,24 %
Koroton takaisinmaksuaika	25,0 a

Saatujen kannattavuuslaskelmien tulosten heikkoutena on kuitenkin se, ettei niissä ole huomioitu, minkälaisista kustannuksista puhutaan pahimmillaan tilanteissa, joissa putki repeää yllättäen johtaen tuotannon alasajoon pahimpaan mahdolliseen aikaan. Sähkön pörssihinnan ollessa korkeimmillaan voi edellä suoritettun esimerkkilaskelman mukaisesti yllättävästä häiriötilanteesta koitua noin 200 000 euron kustannus. Tällöin jo pelkästään yksittäisen putkirepeämän aiheuttamilla kustannuksilla saataisiin Martinkyläntien linjaakin, hyvin kalliista perusparantamisen yksikkökustannuksista huolimatta, uusittua jo 130 metriä, jolloin perusparantamisen taloudellinen kannattavuuskin olisi jo toista luokkaa.

7 Yhteenveto

Kaukolämpöverkkojen ikääntyessä on verkon ylläpito- ja perusparannustoiminnan merkitys hiljalleen korostumassa kaukolämpöalalla. Ikääntyminen yksinään ei kuitenkaan kerro paljoakaan johtojen kunnosta ja perusparannustarpeesta, vaan vanhimmat johto-osuudet vielä vuosikymmenienkin käytön jälkeen voivat olla täysin moitteettomassa kunnossa. Sen sijaan monilla muilla tekijöillä tapauskohtaisesti, kuten rakentamisen laadulla ja maaperäolosuhteilla on monesti havaittavissa paljon olennaisempi vaikutus johtojen vikaantuvuuksiin. Tämä monimutkaistaa suunnitelmallisen perusparantamisen toteuttamista ja perusparannuspäätökset on tehtävä verkkokohtaisesti verkon kuntoa ja sen kehitystä seuraamalla. Toisaalta vielä johtojen suuri vauriotiheyskään ei tee niistä suoraan ensi tilassa perusparannettavia kohteita, vaan käytettävissä olevien resurssien rajallisuus pakottaa ottaman huomioon myös yksittäisten johto-osuuksien aseman koko verkon toiminnan kannalta sekä rajaamaan systemaattisen perusparantamisen koskemaan erikseen määriteltyä kriittistä kohdejohtokantaa.

Käytännön systemaattista perusparannussuunnittelua varten työssä on ensin arvioitu tarvittavan vuotuisen perusparannusvolyymin tasoa ja tämän mahdollistavan budjetin suuruutta verkon käyttövarmuuden turvaamiseksi. Systemaattisen perusparannussuunnittelun edellyttäessä toisaalta myös, että potentiaaliset perusparannuskohteet voidaan asettaa perusparannusohjelmassa keskinäiseen järjestykseen, on Vantaan kaukolämpöverkolle laadittu tätä varten myös verkon riskikartoitus. Riskikartoituksessa johto-osuuksien vikaantuvuuksien ohella otettiin myös kantaa niiden kriittisyyteen lämmöntoimituksen ja -tuotannon sekä turvallisuuskäsitteiden kannalta. Johto-osuuksien eri kategorialuokkiin nimeämisen lisäksi laadittiin kartoituksen pohjalta myös visuaalinen riskikartta, jossa eri luokkiin kuuluviksi määritellyt linjat on värjätty teemavärien mukaan. Kartan etuna on, että sen avulla saadaan nopeasti käsitys verkon yleistilasta sekä pystytään aiempaa helpommin nostamaan esille tärkeimmät, ensi tilassa, perusparannettavat kohteet, vaikkei sillä edelleenkaan voida absoluuttisesti osoittaa johtojen oikeaa uusimisjärjestystä.

Riski- ja vauriokartoituksen lisäksi tässä diplomityössä analysoitiin myös muuten Vantaan kaukolämpöverkon yleistä kuntoa ja tunnistettiin johtojen vikaantuvuuksiin selkeästi yhteydessä olevia tekijöitä. Vikaantuvuuksien syy-seuraus-suhteiden tiedostamisen ansiosta voidaan yrittää jo ennalta arvioida, mitkä johto-osuudet mahdollisesti alkavat oireilla lähitulevaisuudessa.

Kaukolämpöjohtojen perusparantamisen ollessa rahallisesti mittava investointi tarkasteltiin työssä lopuksi myös perusparantamisen taloudellista kannattavuutta huomioimalla johtojen uusimiseen liittyvät säästöpotentiaalit, kuten lämpöhäviöiden pieneneminen uusien eristeiden ansiosta sekä korjauskustannusten poisleikkautuminen. Esimerkkilaskelmien tulosten perusteella kaukolämpöjohtojen perusparantamista ei voida pitää taloudellisesti kannattavana investointina, vaikka saavutettavissa olevat rahalliset säästöt ovat hyvin merkittäviä. Perusparantamisella ensisijaisesti saavutettava hyöty onkin verkon käyttövarmuuden parantuminen kustannussäästöjen ollessa kuitenkin tärkeä lisäperuste.

Lähteet

1. Andersson S., Molin J. & Pletikos C. (1997). Omgivningsförhållandenas betydelse vid val av strategi för ombyggnad och underhåll av fjärrvärmenät - insamlingsfasen. Fjärrvärme föreningen. ISSN 1402-5191.
2. Andersson S., Molin, J. & Pletikos C. (1999). Underlag för riskbedömning och val av strategi för underhåll och förnyelse av fjärrvärmeledningar. Fjärrvärme föreningen. FOU 1999:41.
3. Bergman E. (1998). Vikatiетоjen tilastollinen analyysi, sensuroinnin vaikutus Weibull-mallien estimoinnissa. VTT. Espoo. ISBN 951-38-5005-6. 154 s.
4. Boer S., Korsman J. & Smits I. (2008). Long term heat loss of plastic polybutylene piping systems. The 11th International Symposium on District Heating and Cooling. Reikjavik, Islanti. 8 s.
5. Bøhm B. (2000). On transient heat losses from buried district heating pipes. 24 s. International Journal Of Energy Research. Int. J. Energy Res. 2000; 24:1311-1334.
6. Bøhm B. & Kristjansson H. (2005). Single, twin and triple buried heating pipes: on potential savings in heat losses and costs. International journal of energy research. 29/2005. 12 s.
7. Dalman B. G., Johansson B., Johansson L., Ekström G. & Hofgren K. H. (1992). Leveranssäkerhet. Värmeverksföreningen. Rapportti. 77 s.
8. Energiateollisuus (2005). Kaukolämpöjohdot ja maantiet. Energiateollisuus ry ja Tiehallinto. Suositus L15/2005. ET-kaukolämpökansio 2/3. 44 s. ISBN 951-803-533-4.
9. Energiateollisuus (2007). Kaukolämmön kiertoveden käsittely. Energiateollisuus ry. ET-Kaukolämpökansio 3/3. Suositus KK3/2007. 38 s.
10. Energiateollisuus (2008a). Kaukolämpöalan strategia. Energiateollisuus ry. ISBN 978-952-5615-23-4. 22 s.
11. Energiateollisuus (2008b). Kaukolämpöverkon perusparannustoiminnan yhtenäistäminen. Energiateollisuus ry, Kaukolämpö. Suositus KK 4/2008.
12. Energiateollisuus (2009). Kaukolämpöjohtojen lämpöhäviöitä pienennetään entisestään. Energiateollisuus ry. Lehdistötiedote 8.10.2009.
13. Energiateollisuus (2010). Kiinnivaahdotettujen kaukolämpöjohtojen liitokset. Energiateollisuus ry. Suositus L2/2010. 22 s.
14. Energiateollisuus (2011a). Kaukolämmön keskeytystilasto. Energiateollisuus ry. ET-Kaukolämpökansio 2/8. 38 s.
15. Energiateollisuus (2011b). Kaukolämmön käyttötaloudelliset tunnusluvut 2010. Energiateollisuus ry. ET-Kaukolämpökansio 2/8. 35 s.
16. Energiateollisuus (2011c). Kaukolämpötilasto 2010. Energiateollisuus ry. ET-kaukolämpökansio 7/1. ISSN 0786-4809. 72 s.

17. Energiateollisuus (2011d). Kaukolämpöverkon vauriotilasto 2010. Energiateollisuus ry, Kaukolämpö. ET-Kaukolämpökansio 2/8.
18. Energiateollisuus (2011e). Maanalaisten kiinnivaahdotettujen kaukolämpöjohtojen rakentamiskustannukset 2010. Energiateollisuus ry. ET-Kaukolämpökansio 2/8.
19. Energiateollisuus (2012). Kaukolämpöjohtojen laadunvarmistus. Energiateollisuus ry. [verkkosivut]. Luettu 9.1.2012. Saatavilla: <http://www.energia.fi/energia-ja-ymparisto/kaukolampo-ja-kaukojaahdytys/kaukolampojohtojen-laadunvarmistus>
20. Fingrid (2012). Elspot Suomen Aluehinta. Fingrid Oyj. [verkkosivut]. Luettu: 11.5.2012. Saatavilla: <http://www.fingrid.fi/portal/suomeksi/sahkomarkkinat/taseselvitysinformaatio/elspot-suomen-aluehinta/?week=2&year=2012>
21. Greyvenstein B. & van Zyl J. E. (2007). An experimental investigation into the pressure leakage relationship of some failed water pipes. Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA Vol 56 No 2. s. 117–124.
22. Heller A. J. (2002). Heat-load modelling for large systems. Applied Energy 72 (2002) 371–387.
23. Helsingin Energia (2012). Monta syytä liittyä kaukolämpöön. Helsingin Energia. [verkkosivut]. Luettu: 3.4.2012. Saatavilla: http://www.helen.fi/kaukolampo/kl_edut.html
24. Hlebnikov A., Siirde A. & Paist A. (2007). Basics of optimal design of district heating pipeline diameters and design examples of Estonian old non-optimised district heating networks. Doctoral school of energy- and geo-technology. January 15–20, 2007. Kuressaare, Estonia
25. Hlebnikov A. & Siirde A. (2008). The major characteristic parametres of the Estonian district heating networks, their problems and development. The 11th international symposium on district heating and cooling. 8 s.
26. Hlebnikov A., Volkova A., Dzuba O., Poobus A. & Kask Ü. (2010). Damages of the Tallinn district heating networks and indicative parameters for an estimation of the networks general condition. Scientific Journal of Riga Technical University. (vol 5/2010). s. 49-55.
27. Huntsman. (2000). Pipe insulation fact sheet. Huntsman International LLC.
28. Ikäheimo S., Lounasmeri S. & Walden R. (2005). Yrityksen laskentatoimi. WSOY, Juva. ISBN 951-0-30814-5. 314 s.
29. Kara M., Hoffman K., Ohlström M., Hongisto M., Ruska M., Pirilä P., Syri S., Anttila M. & Vuori S. (2004). Energia Suomessa. 3. painos. Edita Prima Oy. Helsinki. ISBN 951-37-4256-3. 396 s.
30. Koskelainen L., Mäkelä V., Remes M. & Siren A. (1992). Kaukolämpöverkon kunnan analysointi ja arviointi. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Tutkimusraportti. ISBN 951-763-722-5. 114 s.

31. Koskelainen L., Leukkunen R. & Pesari J. (1985). Kaukolämpöjärjestelmän luotettavuuden tarkastelu ja vaikutus mitoittamiseen. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan laitos. 44 s. ISBN 951-763-345-9.
32. Koskelainen L., Meuronen V. & Vakkilainen E. (2009). Kaukolämpöjohtojen optimaalisen eristyspaksuuden tarkastelu. 36 s. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Raportti 4.9.2009.
33. Koskelainen L., Saarela R & Sipilä K. (2006). Kaukolämmön käsikirja. Energiateollisuus ry, Helsinki. 566 s. ISBN 952-5615-08-1
34. Kortelainen L. (2012). Lämpöpalvelupäällikkö, Vantaan Energia Oy. Haastattelu.
35. Kurkela S. (1987). Kaukolämpöverkon ulkopuoliset ja sisäpuoliset korroosiot ja niiden estäminen, teoksessa: Kaukolämpöverkon saneeraus ja korjaus.
36. Lahtinen E. (1987). Kaukolämpöverkon uudistamistöiden taloudellisia tarkasteluja ja johtorakenteiden valintaperusteita, teoksessa: Kaukolämpöverkon saneeraus ja korjaus. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus (INSKO). Julkaisu 129-87. Painos 55.
37. Le Gat Y. & Eisenbeis P. (2000). Using maintenance records to forecast failures in water networks. Urban Water (2/2000). 8 s.
38. Lehtiniemi S. (2012). Energiastrategiapäällikkö, Vantaan Energia. Haastattelu.
39. Leppiniemi J. & Puttonen V. (2002). Yrityksen rahoitus. 2. uudistettu laitos. WSOY, Porvoo. ISBN 951-0-26461-X.
40. Ljubenko A., Poredos A. & Zager M. (2011). Effects of hot-water-pipeline renovation in a district heating system. Journal of mechanical engineering.
41. Logstor (2008). Kaukolämpökäsikirja 2008. Logstor Finland Oy. 04/2008. 194 s.
42. Mansner T. (2012). Vanhempi käyttöinsinööri, Vantaan Energia Oy. Haastattelu.
43. Mittel (2012). Safe investment. Mittel Fjärrvärme AB. [verkkójulkaisu]. Luettu: 26.3.2012. Saatavilla:
<http://www.mittel.se/EN/Default.aspx?tabid=3700&language=sv-SE>
44. Muoviteollisuus ry (2011). PE-putkien sähköhitsaus. Muoviteollisuus ry. Putkijaoston julkaisu no 40. 16 s.
45. Nuorkivi A. (2005). To the rehabilitation strategy of district heating in economies in transition. Helsinki University of Technology, Department of Mechanical Engineering. Espoo. ISBN 951-22-7542-2. 138 s. Väitöstyö.
46. Nuutinen H. (2011). Kaukolämpöverkon suunnittelu. Helen Lämpö. Kaukolämpöverkon suunnittelu -koulutustapahtuma 2.-3.11.2011, Vantaa. Kalvoesitys. 73 s.
47. Ojansuu H. (2012). Verkkopäällikkö, Vantaan Energia Oy. Haastattelu.
48. Park S., Jun H., Kim B. & Im G. (2008). Modelling of water main failure rates using the log-linear ROCOF and the power law process. Water Resour Manage. (22/2008). 14 s.

49. Partanen S. (1983). Kaukolämpöverkon korjaustyöt, teoksessa:
Kaukolämpöverkon ja lämpökeskusten käyttö. Insinöörijärjestöjen
koulutuskeskus (INSKO). ISBN 951-793-915-9.
50. Partanen S. (1984). Kaukolämpöjohtojen vauriot, niiden korjaaminen ja
jälkihoito, teoksessa: Kaukolämpöverkon rakentaminen ja kunnossapito.
Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus (INSKO). Julkaisu 178-84. ISBN 951-794-
343-1.
51. Pasonen M. & Hakkarainen T. (2006). Kaukolämpölinjojen elinikä ja NDT.
VTT. VTT Working papers 53. 27 s. ISBN 951-38-6605-X.
52. Pasonen M. & Hakkarainen T. (2006). Kaukolämpölinjojen elinikä ja NDT.
VTT. 27 s. ISBN 951-38-6605-X.
53. Pennanen P. (1984). Vuotojen paikallistamisen uusinta tekniikkaa, teoksessa:
Kaukolämpöverkon rakentaminen ja kunnossapito. Insinöörijärjestöjen
koulutuskeskus (INSKO). ISBN 951-794-343-1.
54. Pirvola L. (1996). Kaukolämpöverkon perusparannustoiminnan
yhtenäistäminen. Teknillinen korkeakoulu, Otaniemi. 109 s. ISBN 951-22-2937-
4. ISSN 0784-5219
55. Pulakka E. (1987). Kaukolämpöverkon korjaustoiminnasta, teoksessa:
Kaukolämpöverkon saneeraus ja korjaus. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus
(INSKO). Julkaisu 129-87. Painos 55.
56. Pöyry (2011). Kaukolämmön asema suomen energiajärjestelmässä
tulevaisuudessa. Pöyry management consulting oy. Loppuraportti 52A14971. 61
s.
57. Randlov P. (1997). District Heating Handbook. European district heating pipe
manufacturers association. Tanska. 319 s. ISBN 87-90488-00-8.
58. Rantakokko J. (2010). Kansainvälinen energiaverovierailu. Energiateollisuus ry.
148 s.
59. Räsänen E. (1984). Saumaukset ja liitokset muovisuojakuorijohdoissa,
teoksessa: Kaukolämpöverkon rakentaminen ja kunnossapito.
Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus (INSKO). Julkaisu 178-84.
60. Rengholt U. (2003). Mantelskarvteknik: Anvisningar för skarving, isolering
samt larmtrådsmonter I fjärrvärmerör. Svenska fjärrvärme föreningens service
AB. Raportti. 42 s. ISSN 1401-9264.
61. Rostum J. (2000). Statistical modeling of pipe failures in water networks.
Norwegian University of Science and Technology. Trondheim. Väitöstyö. 104 s.
62. Shamir U & Howard C. (1979). An approach to scheduling pipe replacement.
American Water Works Association, journal. 11s.
63. Siitonen M. (2012). Kunnossapitoinsinööri, Vantaan Energia Oy. Haastattelu.
64. Sirola V. (2004). Korkea toimitusvarmuus kohtuukustannuksin. Kunnossapito
6/2004.
65. Sirola V. (2010a). Kaukolämpöverkon lämpöhäviöt - Perusparantamisen ja
uudisrakentamisen energiansäästövaikutus. Energiateollisuus ry. Ep topo
seminaari, kaukolämpö. 10.11.2010. Kalvoesitys. 41 s.

66. Sirola V. (2010b). Kaukolämpöverkon rakentamisen laadunvarmistusjärjestelmä. Energiateollisuus ry. PowerPoint-esitys. Saatavilla: <http://www.energia.fi/energia-ja-ymparisto/kaukolampo-ja-kaukojaahdytys/kaukolampojohtojen-laadunvarmistus> .
67. Sirola V. (2011). Kaukolämpöverkon suunnittelu. Energiateollisuus ry. Kaukolämpöverkon suunnittelu -päivät 2.-3.11.2011. Kalvosarja. 11 s.
68. Sirola V. (2012). Asennusmenettely. Hyrian Kaukolämpöjohtojen liitostyön valvonta- ja asennuskoulutus, kurssimateriaali. Hyvinkää. 1.2.2012-3.2.2012.
69. Suomen kaukolämpö ry (1998). Kaukolämpöjohdon vuodonpaikannusmenetelmät. Suomen kaukolämpö ry. Raportti KK19/1998. ISSN 1238-9366.
70. Suomen kaukolämpö ry (1999). Kaukolämpöverkon kunnossapito. Suomen kaukolämpö ry. Raportti KK2/1999. 17 s. ISSN 1238-9366.
71. Suomen kaukolämpö ry (2003a). Kaukolämpöjohtojen suunnittelu- ja rakentamisohjeet. 50 s. Suomen kaukolämpö ry. Raportti L11/2003.
72. Suomen kaukolämpö ry (2003b). Kaukolämpöjohtotilasto 2002. Suomen kaukolämpö ry. Sky-kansio 7/2. 28 s. ISSN 0786-4787.
73. Tabesh M., Yekta A. & Burrows R. (2009). An Integrated Model to Evaluate Losses in Water Distribution Systems. Water Resources Management, 2009 Vol.23(3). 17 s.
74. Thornton J. (2003). Managing leakage by managing pressure: a practical approach. WATER21 (October 2003). s. 43-44.
75. Torri P. (2008). Tuulettuvan kaukolämpöjohdon vuodonvalvontajärjestelmä. Fimator Oy. Tutkimusraportti 25.2.2008. 19 s.
76. Vaahtola S. (1984). Maaperäolosuhteiden vaikutus johtorakenteiden valintaan, teoksessa: Kaukolämpöverkon rakentaminen ja kunnossapito. ISBN 951-794-343-1.
77. Vaittinen H. (1987). Kourueristeisten betonielementtikanavien saneeraukset, teoksessa Kaukolämpöverkon saneeraus ja korjaus. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus (INSKO). Julkaisu 129-87. Painos 55.
78. Vantaan Energia (2012). Vantaan Energia Oy:n tilasto-, kuva-, ja muu tietomateriaali. Vantaan Energia Oy.
79. Van Zyl J. E. & Clayton C. (2007). The effect of pressure on leakage in water distribution systems. Proceedings of the ICE - Water Management, Volume 160, Issue 2, 01 June 2007. s. 109 –114.
80. Watson T., Chirstian C., Mason A. Smith & Meyer, R. (2004). Bayesian-based pipe failure model. Journal of Hydroinformatics (4/2004). 6 s.
81. Werner S. & Constantinescu N. (2006). Possibilities with more district heating in Europe. 63 s. Euroheat & Power. Loppuraportti.
82. Wilhelms T. (2011). Energiavuosi 2010, Kaukolämpö. Energiateollisuus ry. Kalvosarja. 26 s. Saatavilla: <http://www.slideshare.net/energiateollisuus/kaukolmp-2010-graafeina>

83. Zinko H., Bøhm B., Kristjansson H., Ottosson U., Rämä M. & Sipilä K. (2008). District heating distribution in areas with low heat demand density. International Energy Agency. 134 s.
84. Åkerström Å. (2004). Reinvesteringsmodell för befintligt fjärrvärmenät. Lunds tekniska högskola. Examensarbete. 121 s.

Liiteluettelo

Liite 1. lämpövastusten laskeminen. 2 sivua.

Liite 1. Lämpövastusten laskeminen

Alla esitetyissä lämpövastusten laskentayhtälöissä käytetyt symbolit perustuvat kuvan 44 merkintöihin mineraalieristeisille betonielementtikanaaville ja kiinnivaahdotetuille putkille.

Eristetyille putkille maaperän lämpövastus voidaan määrittää noin 0,5 % tarkkuudella yhtälöllä

$$R_g = \frac{1}{2\pi\lambda_g} \left[\ln \left(\frac{4H}{D_c} \right) - \frac{(D_c/2E)^2 + (D_c/4H)^2 + D_c^2 / (4(4H^2 + E^2))}{(1+\beta)(1-\beta) - (D_c/2E)^2} \right],$$

jossa

$$\beta = \frac{\lambda_g}{\lambda_i} \ln \left(\frac{D_i}{D_p} \right)$$

Betonielementtikanaavien tapauksessa maaperän lämpövastukseen on vielä lisättävä lämpövastus betonielementtikanaavan pinnalla R_{hg} . Maanpinnan lämpövastus muutetaan tavallisesti ekvivalentiksi maakerrokseksi, jolloin virtausputken korjattu sijaintisyvyys saadaan yhtälöllä

$$H = H' + \frac{\lambda_g}{\lambda_{gs}}$$

jossa h_{gs} = lämmönsiirtokerroin maanpinnalla (yleensä 12-15 W/m²,K)

λ_g = maaperän lämmönjohtavuus (W/m,K)

H' = putken todellinen sijaintisyvyys (m)

Eristettyjen putkien eristeen ja vaipan lämpövastus saadaan kaavasta

$$R_i = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \left(\frac{D_i}{D_p} \right) + \frac{1}{2\pi\lambda_c} \ln \frac{D_c}{D_i} + R_{hi}$$

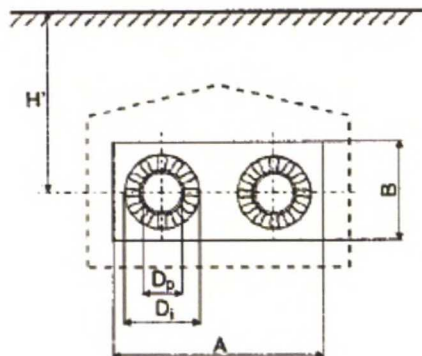
jossa D_p = eristeen sisähalkaisija = putken ulkohalkaisija (m)

D_i = eristeen ulkohalkaisija (m)

R_{hi} = lämpövastus eristeen pinnalla betonikanavassa, jossa on ilmatila.

D_c määritetään kuvasta 44.

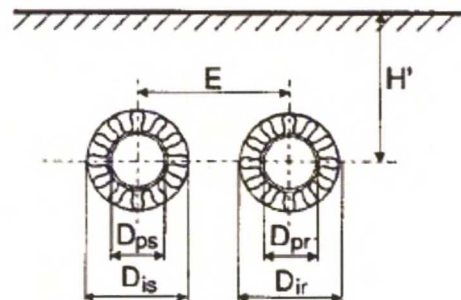
Concrete ducts with circular mineral wool insulation



$$D_c = \frac{2.2 \cdot A \cdot B}{A + B} \quad h_s = 7.7 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$R_{hi} = \frac{1}{\pi D_i h_s} \quad R_{hg} = \frac{1}{2(A+B) \cdot h_s} \quad R_m = R_g$$

Preinsulated pipes



$$D_c = D_i \quad R_{hg} = R_{hi} = 0$$

$$R_m = \frac{1}{4\pi\lambda_g} \ln \left(1 + \left(\frac{2H}{E} \right)^2 \right)$$

Kuva 44 Betonielementtikanavien ja kiinnivaahdotettujen yksijohtoputkien lämpövastukset.

Lähde: Bøhm 2000

